

放射化学

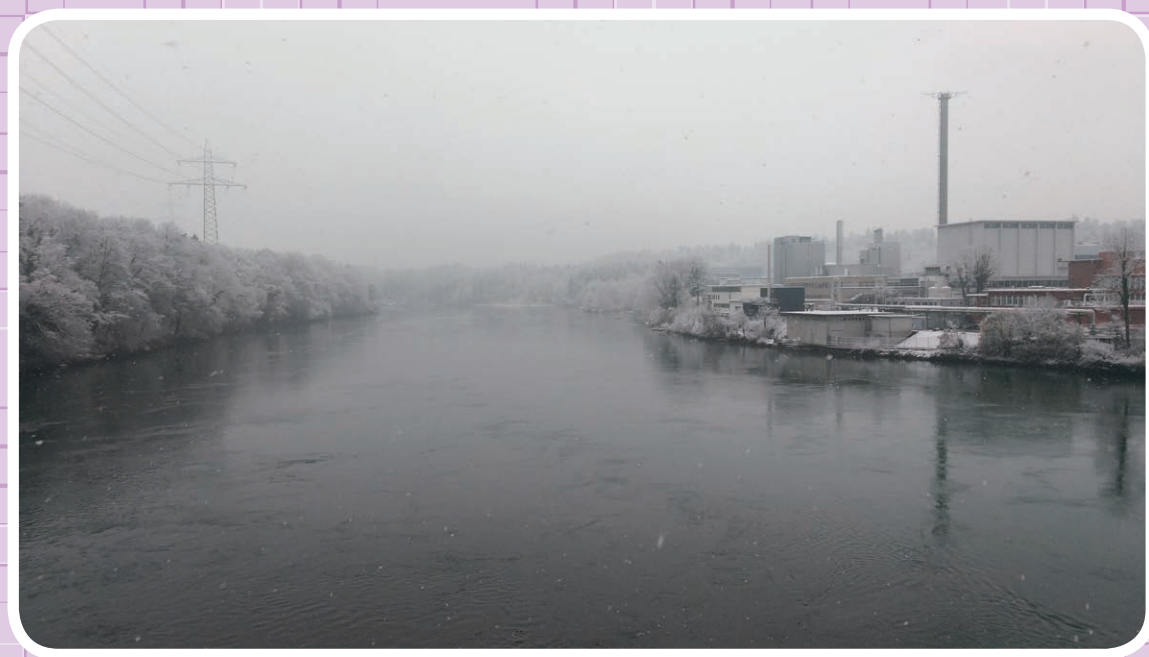
第38号

原著

原発事故における放射性核種の継続的摂取による体内蓄積量の算出

ニュース

大阪大学放射線科学基盤機構の発足



日本放射化学会

The Japan Society of Nuclear and Radiochemical Sciences

放射化学

第38号

平成30年(2018年)9月10日

目次

会員がメリットを感じる学会を目指して(篠原 厚)	1
--------------------------------	---

原著

原発事故における放射性核種の継続的摂取による 体内蓄積量の算出(馬場 宏、高橋成人)	3
---	---

ニュース

大阪大学放射線科学基盤機構の発足(豊嶋厚史、篠原 厚)	15
原子炉の近況(京都大学研究用原子炉 KUR)(高宮幸一)	18
東北大学電子光理学研究センターの近況報告(菊永英寿)	20

コラム

ドイツ ヘルムホルツ研究所マインツ&スイス ポール・シェラー研究所滞在記(佐藤哲也)	22
--	----

会議報告

第19回「環境放射能」研究会(吉田 剛)	25
「第12回核融合エネルギー連合講演会」開催報告 (第12回核融合エネルギー連合講演会事務局)	27
Eleventh International Conference on Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry (MARC XI)(鈴木達也)	28
RadChem2018 会議報告(島田亜佐子)	30

時過ぎて

Physics and sake with Koh Sakamoto (Michael Paul) 32

情報プラザ (国際国内会議) 34

本だな

「エネルギーの視点から見た放射線 - 強くて、恐いけど、怖くない」
田辺哲朗 著 (鈴木達也) 35

学位論文要録

混合原子価鉄三核フッ素置換安息香酸錯体の原子価揺動の
 ^{57}Fe メスbauer分光法による研究 (小木曾了) 36

学会だより 38

2018 日本放射化学会年会・第 62 回放射化学討論会 開催情報 43

日本学術会議提言 44

「放射化学」規定など 84

「放射化学」論文編集委員会規定

「放射化学」発行規定

「放射化学」論文投稿規則

「放射化学」論文投稿の手引き

学位論文要録執筆候補者の推薦について

「会員の声」欄へのご寄稿のお願い

会員の異動に伴う連絡のお願い

賛助会員リスト

広告

表紙の説明

アーレ川にかかる PSI アーレ橋より撮影した水墨画のようなポール・シェラー研究所

会員がメリットを感じる学会を目指して

篠原 厚 (大阪大学大学院理学研究科)



平成30年(2018年)4月1日より会長を仰せつかっております。私は、中西前会長の2期目から副会長として理事会に参画させて頂いておりましたが、今、我々の日本放射化学会は厳しい状況にあることを再認識しています。学会創設以来、高邁な創設の理念と併せて、当初から多くの課題が指摘されていましたが、歴代の会長の努力にもかかわらず、ほとんど解決されないままで、私がさらに何が出来るか悩んでいます。ただ、抜本的変革が必要な時期であることは確かです。しかし同時に、新しい世界が見えかけている良い時期であるとも思っています。

放射化学は自然科学の中でもベースになる学問の一つで、ベクレルの放射能の発見以来、強い力や弱い力も係わる基礎化学として物質観の拡張に貢献し、化学からの核現象研究、核現象による化学研究を進展させ、広い応用分野も含む学際的科学としても進化を遂げてきています。核現象と核エネルギーを安全に利用するためには、その基礎研究部分を担う放射化学・核化学の発展、そしてその教育と人材育成の重要性は言うまでもありません。我々の日本放射化学会は、この高邁な理念の元、学際的分野も含めた広いスタンスで、会員(研究者)の研究の促進と交流の場を与えること、放射化学にたいする社会的認識の向上、放射線教育の普及などを目的に、平成11年(1999年)に

設立され、来年で20周年を迎えます。

ここで、放射化学分野の状況を考えると、必ずしも良くはありません。福島原発事故以降、放射線や原子力に対する風当たりはきつく、安全文化の醸成として関連規制は厳しくなる一方で、ほとんどのところで老朽化した施設の更新が出来ず、関連する大学の講座は減る一方(これはかなり以前からですが)です。学会に目を転ずると、当初の高邁な理念にもかかわらず、会員も増えることはなく徐々に(特に若手層が)減ってきています。

しかしながら、今の社会のニーズや学問の方向を考えると、放射線関連科学を取り巻く情勢は、実は、決して悪いものでもありません。むしろRIを取り扱える人材は益々必要となっていますし、多くの新しい教育研究の芽があり、どんどん伸びているところもあります。超重元素・放射性元素の科学、宇宙科学、ミュオン科学、加速器・量子ビーム利用、福島関連科学、新しいプローブ・分析手法等々、そして最近注目されている医学応用、更に、放射線、RIや核燃の関連する安全規制やリスク・セキュリティー関連も我々が絡んで行くべき重要分野と思います。

前向きに考えるネタはたくさんあります。手前味噌ですが、私の所属する大阪大学では、今年度、放射線関連施設を一元化する放射線科学基盤機構という組織を立ち上げました。安全管理の全学的体制整備の件もありますが、とにかく分野横断的な新しい教育研究を立ち上げ、産学共創を進めるのが目的で、開かれた組織として学外機関との多様な連携を通じ、当該分野の活性化を図ろうとするものです。その中でも放射化学は中核的な分野と認識されており、私自身、放射化学は新たな展開の可能性を秘めていると再認識しています。今、放射化学はもっと前向きに拡張志向で進むべき時です。そのためのベースになるのが放射化学会です。

しかし、放射化学会の現状を見ると、はじめに述べたように厳しい状況にあります。福島原子力発電所事故の時、放射化学会は事故への対応に最

も重要かつ多くの人材を有する学会の一つであったはずです（現に、当時活躍した研究者の多くは放射化学のメンバーでした）。しかるに、放射化学学会は社会や国から存在が認識されていませんでした。これまでの基礎に軸を置く高邁な学会創設の理念はすばらしいものですが、間違えてはいけないのは、基礎を軸とするのは研究者であり、学会ではありません。学会は、研究者にそのような環境を与えるものです。会員の皆さまは個々には上記のテーマに限らず活発に教育研究を進められている方も多くいらっしゃいますが、学会としてうまく取り込めておらず、組織的な発展に繋がっていないのが現状ではないでしょうか。もちろん、これらは放射化学単独で進めることが出来るものでもなく、広く関連学協会との連携、広い分野の研究者の交流が必要です。それらをプロモートし、人や予算を集める場を提供するのが学会の大きな役割の一つです。学会自身は、新しい学術分野の構築や教育人材育、そして我々の分野で重要な放射線の管理や安全性などの枠組みを国に提案したり、連携して施策を進めるぐらいの機能を備えたいものです。そのためにも、関連学協会との強い連携体制と、社会に貢献できる学会機能が重要となってきます。

今、まず検討を始めたい観点として、次の4点があります。すなわち、「学会の法人化」、「会員増強」、「若手の活性化」、「英文ジャーナルの在り方」です。これらいずれも以前から抱えている課題ですが、おそらく、中西前会長がすでに手がけられている周辺学協会との連携体制の構築などを

含めた、抜本的な対応が必要かと思います。3番目の若手の件は、皆さんご存じの通り、今、「若手の会」が新しい体制を自ら築こうとしています。若手が居なくなれば学会は自然に消滅します。この件は会員増強とも大きく関係しており、最大限努力すべきところでしょう。英文ジャーナルについては、課題と言うより、もはや完全な模様替えか廃刊かを選択する時期と思っています。これまで見送られてきた法人化は、現在の研究者を取り巻く社会の厳しい変革の中では、研究者に与えられるべき学会の機能を発揮するには必須条件です。その実現により行動範囲が格段に広がり、組織として正常に動くことが出来ます。

これら全ての底流に流れる私の方針は、「会員がメリットを感じる学会」を目指すというものです。「もっと会費を払いたい！」と思えるような学会になれば上記の問題は全て解決します。個人である会員（研究者や学生）に対して組織として何が出来るか、何をすべきか、皆さんとじっくり真剣に考え、浮かび上がった方策を少しでも実施できればと思っています。好循環に持って行く最初の一押しのために、理事を中心に広く会員にも有志を募り、幾つかの行動を始めたく思います。会員の皆さまは、最初は嘘でも良いので、学会のメリットを感じた振りをして積極的に学会に係わって下さい。そうすれば、全体が良い方向に回り出し、本当にメリットを感じる学会となると思います。皆さん全員で、社会的存在意義のある、放射化学の進化に寄与する、前向きな、そして我々のためになる放射化学学会にして行きましょう。

原 著

原発事故における放射性核種の継続的摂取による体内蓄積量の算出 Evaluation of Accumulation of Radionuclides during Continuous Intake of Radioactivities dispersed by the Accident of Nuclear Power Reactors

馬場 宏¹、高橋成人^{2,*}

¹〒569-0082 大阪府高槻市明野町 1-5-304

²大阪大学核物理研究センター：〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 10-1

Hiroshi BABA¹, Naruto TAKAHASHI²

¹1-5-302, Akeno-cho, Takatsuki, Osaka 569-0082, Japan

²Research Center for Nuclear Physics Osaka University, 10-1 Mihogaoka,
Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

(2018年8月27日受理)

要旨

セシウム-137 やヨウ素-131 について開発した内部被曝量を計算する手法をストロンチウム-90、プルトニウム-239、トリチウムやセシウム-134 に適用することは福島第一原子力発電所の事故において重要である。内部被曝を経過時間の関数として追跡することが可能となり、ICRP アプローチを強化することでより確実な放射線防護対策を立てることができる。さらに、体内残留の放射エネルギーと体から出た放射エネルギーを別々に推測することができる。生物学的半減期の決定や海産物中への放射能の集積など、これまでに試みられていない側面についても情報が得られる。

キーワード

セシウム-137、セシウム-134、ストロンチウム-90、トリチウム、プルトニウム-239、福島第一原子力発電所、数値解析、放射能、内部被曝、核分裂生成物、リスク評価

Key words

Cesium-137, Cesium-134, Strontium-90, Tritium, Plutonium-239,
Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Numerical Analysis, Radioactivity, Internal Exposure, Fission Product, Risk Assessment,

はじめに

2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故以来、約7年が経過した。この原発事故ではチェルノブイリ原発事故のおよそ1/10の放射能が環境に放出されたと推定され、人々を外部被曝、内部被曝の恐怖に陥れることになった。

事故直後は汚染した食物の摂取による内部被曝

が特に問題視され、風評被害も加わって、乳幼児を抱える母親たちは大恐慌をきたした。政府はとりえず食品安全の目安を与える暫定基準値なるものを出して当座をしのいだ。が、基準値を決めるに当たって拠りどころとしている文献¹⁾を見ても肝心のところは明確に示されていないようである。これではさしたる科学的根拠もなく、世間の不安や風評被害を鎮めるにはいたらなかった。そ

* Corresponding author, e-mail: naruhito102@gmail.com

れから7年が経過した現在では、内部汚染の恐れが遠のくと共に忘れられ、食品の基準値は暫定のまま据え置かれている。

外部被曝と異なり、内部被曝には取り込んだ長寿命の放射能が体内に蓄積され、際限なく被曝量が増えていくのではないかという不安がつきまとう。放射性核種を体内に取り込んだ時人々が不安に思うのは以下のようなものであろう。すなわち、一旦体内に取り込んでしまった放射性核種はいつまで体内に留まるのか、汚染物質を継続的に摂取し続けると、どれくらい放射能が体内に蓄積されるか等々であるが、その答えはどこにも与えられていない。

そこで我々は新しい内部被曝の計算法²⁾を開発し、¹³⁷Csについて実際に計算を行った結果、同じ汚染環境の中で¹³⁷Csを継続的に体内に取り込み続けた場合の被曝量は3年目に最大となってそれ以後増加せず、結局のところ、内部被曝の危険は外部被曝と同程度と考えて良いと結論された。

しかし、原発事故に絡んで懸念される核種が手つかずのまま放置されていることを解消する必要がある。その核種とは、²³⁹Pu、⁹⁰Sr、トリチウム³Hである、さらに、福島原発事故では¹³⁴Csが¹³⁷Csと同程度に環境に放出されたことが明らかになった³⁾。文献2)で展開した計算方式を基にこれらの核種についての放射線被害の状況を検討し、この計算法の有用性を検討する。

核分裂生成物の中で問題になる長寿命核種は¹³⁷Csと⁹⁰Sr、それに炉内の核反応で大量に生成するトリチウムである。 γ 線検出器の助けを借りて簡単に放射能の同定・定量が可能な¹³⁷Csと異なり、 γ 線を出さない⁹⁰Srとトリチウムのモニタリングはその必要性が叫ばれていてもこれまで一般に周知されるような状態にはなっていない。⁹⁰Srについては、定量するためには熟練した分析化学者による化学分離操作が不可欠であり、¹³⁷Csのように広域の野外モニタリングを行うためには膨大な数の試料を処理するマンパワーと設備が必要になって実施は到底不可能である。トリチウムの場合も液体シンチレーションカウンターによる測定の際の測定試料の調製に追われて¹³⁷Csのように簡単に処理が進まない恐れがある。

I. 前提条件

放射線量を表すグレイ (Gy) という単位では吸収線量を与える。1 Gyはkg当り1ジュール(J)のエネルギーを運ぶ線量である。この放射線が相手に与える効果は、放射線の種類によって異なっており、この差異を考慮に入れた実効線量がシーベルト (Sv) で線量当量率と呼ばれている。すなわち、SvとGyとの間には

$$Sv = W_R \times Gy \quad (1)$$

という関係がある。 W_R は放射線荷重係数と呼ばれ、 β 線、 γ 線に対しては1、中性子線に対してはエネルギー領域に応じて5から20の値を取る。最後に、アルファ線に対しては20となる。

1 JのエネルギーをMeV単位に換算すると 6.25×10^{12} MeVになる。従って、壊変エネルギーが E_d (MeV)である放射能が放射する1 Gyの放射線に相当する壊変数は、kg当たり $6.25 \times 10^{12}/E_d$ 個である。我々が求めたいのは、シーベルトとベクレル (Bq) との関係であるが、通常の物理量と異なり、シーベルトは単位そのものが変数であることが問題である。シーベルト数という物理量と単位の大きさは逆比例の関係にあり、シーベルト数がグレイ数の W_R 倍になった分だけ単位量は $1/W_R$ 倍に縮小される。それ故、 D mSvに対応する壊変数は

$$A = 6.25 \times \frac{10^9 D}{T W_R E_d} \quad (2)$$

で与えられることになる。ここで T は1年に相当する秒数、 3.15×10^7 sである。この A という数値が外部被曝線量を考える上での基準値を与える。

¹³⁷Csの場合、壊変エネルギーは1.17 MeVであるが、そのうち γ 壊変のエネルギーは0.66 MeVで残りの0.51 MeVは β 壊変に伴って放出される。しかし β 線が伴うエネルギーは平均でその約1/3にしかならず、残りの2/3はニュートリノがそのまま系外に持ち去ってしまう。従って、実効壊変エネルギーとしては、0.83 MeVを用いる必要がある。その結果、1 mSv/年に対応するベクレル数は238 Bqであり、1 μ Sv/時に対応するベクレル数は2090 Bqということになる。

II. 被曝量の計算

被曝量を計算するにあたって必要になる核

データは、Table of Isotopes⁴⁾ 及び Karlsruher Nuklidkarte⁵⁾ を参照した。

内部被曝の道筋の一つとして食品を摂取した場合を考える。食物として摂取した放射性核種は、物理的に減衰するか身体から外に排出されるまで体内で放射線を出し続け、継続的な被曝を引き起こす。その積算効果を考慮して、年間被曝線量の基準値とされる 1 mSv に対する食品の基準値を求める必要がある。その基準値を求めるに当たっては、当該食品を毎日同量摂取し続けた場合の総壊変数を求めなければならない。

内部被曝の算出は、ICRP の方式に従って預託実効線量として計算することになっている。原子力安全委員会の公布した「環境放射能モニタリングに関する指針」によれば、預託実効線量は初日に摂取した食品の放射能に実効線量係数を乗じた値を 365 倍して与えられる。これによって、指針に示された預託実効線量の計算式は同様に汚染された食品を初めの 1 年だけ毎日摂取した後、残りの 49 年間は摂取をやめるという奇妙な状態を扱うことになる解釈される。

その上、広島・長崎の現状を見ても、環境汚染が 70 年もの間物理的半減期に従う減衰状態に止まっていることはあり得ない。現に、福島原発事故の直後に朝日新聞に報道された空間線量率は約 300 日の半減期で減少していた。従って、預託実効線量が正しい被曝線量を与えるとは到底期待できず、実態より大幅な過大評価をする結果になる。

しかしながら、原子力安全委員会が指定した条件で、実効線量係数を本論文の方式 ((15) 式参照) で ¹³⁷Cs について計算すると、指針の与える実効線量係数は今回計算した値の 22% にしかない。また、指針に例示されている ¹³⁷Cs と ⁹⁰Sr の実効線量係数の大小関係も、それぞれの壊変エネルギーの大きさや生物学的半減期の値の違いを考えると説明できない。

さらに、それら β - γ 壊変核種について、ニュートリノが持ち去るエネルギーに対する補正が考慮されているのかも不明である。また ⁹⁰Sr については娘核種の ⁹⁰Y の寄与を考慮しているのかも不明である。

上に述べた様々な不確定要素が考えられる中

で、被曝量が基準値である 1 mSv/年の範囲に収まる程度の汚染に対して、大きな誤差を包含する長期積算線量を計算することに意味はない。むしろ 1 年毎の被曝量を正確に把握し、適切な対応を取ることが大切であると思われる。本稿では、そのような視点に立って、普遍的な形で年間被曝量を算出する議論を進めることにする。

汚染された食品を摂取し始めた時点で、その食品 1 kg 当たりに含まれる放射性核種の原子数 N_0 に対して、摂取後 1 年間の被曝量は、当該放射性核種が体内で壊れた数 ΔN に他ならず、

$$\Delta N = N_0 f_a \quad (3)$$

ただし一年目に対して

$$f_a = f_a^1 = \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right) \sum_i e^{-i\lambda} \{1 - e^{-(m-i)\lambda}\} \\ = \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right) \left\{ \frac{(1 - e^{-m\lambda})}{1 - e^{-\lambda}} - \frac{e^{-m\lambda} - e^{-m\Lambda}}{1 - e^{-(\Lambda-\lambda)}} \right\} \quad (4)$$

二年目に対しては

$$f_a = f_a^2 = f_a^1 e^{-m\lambda} + g \quad (5)$$

ここで

$$g = \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right) (1 - e^{-m\Lambda}) \sum_i e^{-i\Lambda} e^{-(m-i)\lambda} \\ = \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right) \frac{(1 - e^{-m\Lambda})(e^{-m\lambda} - e^{-m\Lambda})}{1 - e^{-(\Lambda-\lambda)}} \quad (6)$$

さらに 3 年目以降のケースに対しては

$$f_a = f_a^n \\ = f_a^1 e^{-(n-1)m\lambda} + g e^{-(n-2)m\lambda} \sum_j e^{-jn(\Lambda-\lambda)} \quad (7)$$

と導かれる。ただし、(4) 式中の和 \sum_i は i について 0 から $m-1$ までを、 \sum_j は j について 0 から $n-2$ までをとるものとする。ここで m は一年の日数 365 である。また λ は日を単位として表した物理的半減期 t_p と $\lambda = 0,693/t_p$ なる関係にある壊変定数と呼ばれる物理量で、 Λ は物理的半減期と生物学的半減期 t_b との相乗効果を表す“実効半減期”に対応する壊変定数である。実効半減期 t_e と t_p 、 t_b との間には

$$\frac{1}{t_e} = \frac{1}{t_p} + \frac{1}{t_b} \quad (8)$$

なる関係がある。¹³⁷Cs の生物学的半減期は ICRP

によって110日⁶⁾とされているので、その値を採用すると実効半減期は109日となる。上の(4)式から(7)式までは、すでに3年前の放射化学ニュースに発表²⁾したが、訂正した式を与えておく。

上に示した f_a の導出手法の正しさを検証するために、 $m\lambda, m\lambda \ll 1$ なる条件が成り立つ場合を考える。その結果は、事故発生から n 年後の被曝量が

$$f_a^n N_0 = \left(n - \frac{1}{2}\right) m(m\lambda N_0) \quad (9)$$

となって、まさに予期した結果を与えることが確かめられた。

ΔN が A に等しいという要請から $N_0 = A/f_a$ が得られるが、期間 T 秒にわたって均等に被曝し続けたとすると、放射能強度は A/T Bqで与えられる。 ^{137}Cs のように長寿命の核種については、 T は一年間の秒数、 3.15×10^7 sであるが、半減期が短い核種に対しては事故発生後実効半減期の10半減期程度の時間を T に与えるのが適当であろう。

上の(4) - (7)式により計算された ^{137}Cs に対する増倍係数 f_a の年ごとの値をFig. 1に示す。 ^{137}Cs に対する f_a の値は一年目2.18、二年目3.38、三年目に3.43でピークに達し、その後は ^{137}Cs の物理半減期に従って減衰していく。実際問題として、同様に汚染された同一食品を1年以上摂取し続けるのは極めて特殊な場合に限られるが、最も過酷な例として摂取し続ける場合を想定して、 ^{137}Cs に対する f_a の値を3.5と採ることとする。

放射線防護の点から無視できない核種でありながら、これまで全くと言って良いほど触れられてこなかった核種が ^{239}Pu 、 ^{90}Sr そしてトリチウム ^3H である。次節ではこの3核種に加えて、福島で ^{137}Cs とほぼ1対1の割合で観測された ^{134}Cs を加えた4核種について、その内部被曝をどう扱っていくことができるかを ^{137}Cs と比較する形で考えてみたい。

Ⅲ. 内部被曝によって与えられる放射線損傷

前節の結果をみると、 ^{137}Cs の場合、限りなく体内に放射能が溜まり続けるという懸念はひとまず払拭されたと言える。このような結果が得られたのは、 ^{137}Cs の生物学的半減期が比較的短かったせいである。逆に ^{90}Sr や ^{239}Pu は生物学的半減

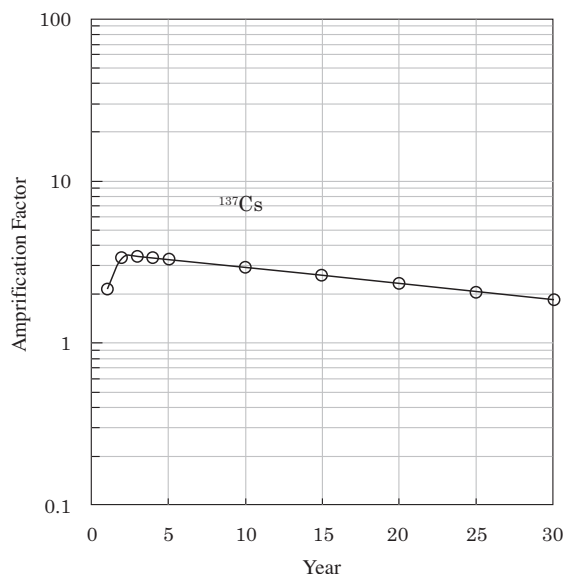


Fig. 1 Amplification factor f_a for ^{137}Cs

期が長く、 ^{137}Cs とは異なる様相を呈するはずである。本節ではまず ^{90}Sr についての検討から始めることにする。

今回、放射能を体内に取り込んだ場合その蓄積によって、被曝量がどのくらい増倍されるかという増倍係数 f_a が正確に計算されるようになったので、その被害の程度を ^{137}Cs と比較して論じることが可能になった。すなわち、放射線損傷の大きさは、与えられた壊変エネルギーの量 (mSv/年) に比例すると考えるのである。それ以外に、二次的要因として放射線の持つエネルギーが高いほどアニーリング効果が下がる可能性があること、 β 線と γ 線では到達距離 (飛程) が異なるため損傷箇所の密度に差が出ること、海中での魚介類へのトリチウムの濃縮の問題などを考慮する必要がある。しかしここでは、それらの影響はトリチウムの濃縮の問題以外は無視することにする。その上で、着目する核種に対して求めた増倍係数 f_a の経時変化を基に、その放射線損傷の大きさ Ω を求める。そうすると、 Ω は次のように考えられる。

$$\begin{aligned} \Omega &= \left(\frac{N_0 f_a}{T}\right) E_d W_R \\ &= \left(\frac{R_0 f_a}{\lambda T}\right) E_d W_R \end{aligned} \quad (10)$$

ここで R_0 は食品の汚染度 (Bq/kg) である。後

述するように大気汚染が問題となる ^{239}Pu についてはとりあえず (Bq/m^3) という単位を考えることにする。

ここで基準に取る ^{137}Cs と目的の核種 B の R_0 が等しい時の両者の Ω を比較する。

$$\Omega_B = \Omega_0 \left(\frac{f_a E_d W_R}{\lambda T} \right)_B / \left(\frac{f_a E_d W_R}{\lambda T} \right)_{\text{Cs}} \quad (11)$$

ただし、 Ω_0 は ^{137}Cs の f_a の値を最大の 3.5 とした時の Ω_{Cs} の値であって、 $R_0 = 48.5 \text{ Bq}/\text{kg}$ とした時、 Ω_0 は $1 \text{ mSv}/\text{年}$ になる。この式によって、異なる放射性核種の間で放射線損傷の大きさを比較することが可能になる。

III .1 ^{90}Sr

今回開発された内部被曝の評価計算法を、被曝の結果生体が被る放射線損傷の大きさの観点から見ることで、その危険度を察知し、事故発生後の防護対策を容易にすることを試みる。この情報が与えられれば、僅かなサンプル数の観測データがあれば、適切な対応策が立てられることになるであろう。

^{90}Sr を ^{137}Cs と同じ放射能だけ取り込んだ時に受ける相対的放射線損傷 Ω/Ω_0 を (11) 式によって計算した結果を Table 1 と Fig. 2 に示す。ただし、 ^{90}Sr に対する f_a を計算するに当たっては、生物学的半減期を 50 年⁷⁾ とした。体内に取り込んだ放射線量 (放射能) が両者で等しければ、最大で ^{90}Sr では ^{137}Cs の最大値の 6.2 倍になることが図から読み取れる。なお、図には ^{137}Cs の増倍係数 f_a の絶対値を同時にプロットしてある。図中の太線は 1 mSv の被曝との関係を示すために挿入した。このラインを越えれば放射線防護の対策を考える必要があると判断しなければならない。

揮発性がセシウムに比べて低い ^{90}Sr の場合、 ^{137}Cs に比べ空中に飛散する割合は大体 1/10 以下という報告⁸⁾ があるが、その一方で 1/100 以下という報告⁹⁾ もある。土壌から農作物への ^{90}Sr の移行は ^{137}Cs よりほぼ 1 桁高いという報告¹⁰⁾ があるので、結局 ^{90}Sr による内部被曝は最大で ^{137}Cs のおよそ 6 倍となる可能性があることを覚悟しておく必要がある。

^{90}Sr にはもう一つ困った問題がある。それは

Table 1 Amplification factor and relative radiation dose for $^{90}\text{Sr}(+^{90}\text{Y})$. Ω_0 gives Ω_{Cs} for the maximum value 3.5 of the amplification factor of ^{137}Cs .

Year	f_a	Ω/Ω_0 (Sr)	$\Omega/\Omega_0(\text{Sr} + \text{Y})$
1	3.26	0.19	0.95
2	11.62	0.69	3.39
3	19.47	1.15	5.68
4	26.83	1.59	7.82
5	33.71	2.00	9.84
10	61.87	3.67	18.1
15	81.28	4.82	23.7
20	93.88	5.57	27.4
25	101.27	6.01	29.6
29	104.26	6.18	30.4
30	104.69	6.21	30.6
31	104.98	6.23	30.7
35	105.13	6.23	30.7
36	104.93	6.22	30.6
37	104.66	6.21	30.6
38	104.28	6.18	30.4

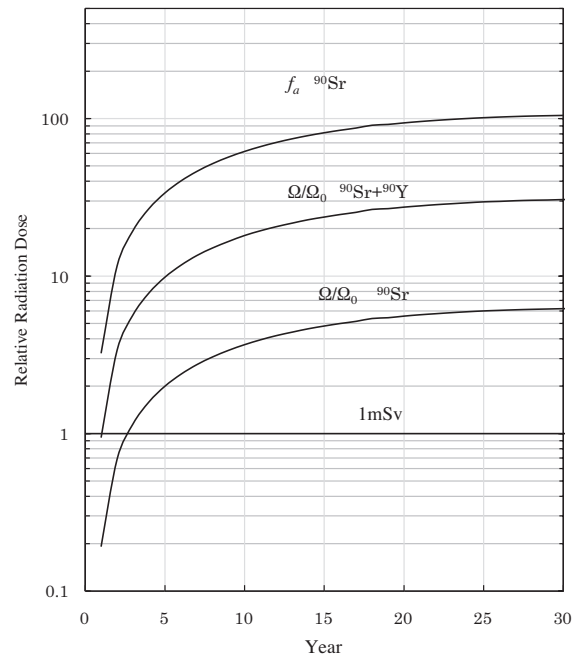


Fig. 2 Amplification factor f_a and radiation damage of the $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ system relative to the radiation damage of ^{137}Cs . The solid horizontal line is given to indicate the 1 mSv exposure level for ^{137}Cs of the intake being 48.5 Bq .

^{90}Sr が崩壊すると半減期64時間の娘核種 ^{90}Y を生じることである。そのため、 ^{90}Sr を体内に取り込んだ場合には ^{90}Y による被曝も合わせて考えなければならない。最初に ^{90}Sr のみが存在していたとしても15日も経つと娘の ^{90}Y との間で平衡状態(放射平衡)が成立して、両者の壊変数は等しくなる。ただし通常の自由空間での放射平衡と異なり、閉じられた体系内部における親核種と娘核種の間には

$$\frac{dN_p}{dt} = -\lambda_p N_p \quad (12)$$

$$\frac{dN_d}{dt} = -\lambda_p N_p - \lambda_d N_d$$

という連立方程式が成り立つ。この式を解いて得られる放射平衡は

$$\lambda_d N_d = \lambda_p N_p \quad (13)$$

と表わされる。これは $R_d = \lambda_d N_d = R_p \left(\frac{\lambda_d}{\lambda_p}\right)$ と書き換えられるので、娘核の放射能は (λ/λ_d) 倍しか親核種の放射能に加わらないことを示している。

ここで ^{90}Y の生物学的半減期を知る必要がある。必須元素であるカルシウムを同族に持つストロンチウムが非常に長い生物学的半減期を持つのは当然であるが、必須元素に縁がないイットリウムは生物学的半減期が非常に短いと思われる。後述するトリチウム水の生物学的半減期が10日と40日であることから考えて、 ^{90}Y の半減期をトリチウムの半減期が長い方の成分と同じ40日と仮定することにする。

^{90}Y は99%以上が β 崩壊であり、その最大エネルギーは2.28 MeVである。ニュートリノの持ち去るエネルギーを考慮すると、1崩壊当たりの平均エネルギーは0.76 MeVと考えられる。その場合、 ^{90}Y の寄与分は、 ^{90}Sr の実効壊変エネルギー E_d を壊変エネルギー0.546 MeVの1/3に相当する0.182 MeVから $E_{ef} = \{0.182 + 0.76(\lambda/\lambda_d)\}$ MeVに増やすだけでよく、ベクレル数が変わることはない。その結果、(10)式で与えられる ^{90}Sr の放射線損傷の大きさ Ω が $E_{ef}/E_d = 4.9$ 倍に増えるだけである。

こうして求めた ^{90}Sr - ^{90}Y の放射線損傷をTable 1とFig.2に示した。図から分かるように、 ^{90}Sr の内部被曝は最大で ^{137}Cs の30倍になる。たとえ食

品の汚染度が1/10程度であったとしても放置するわけには行かない。ただ、放射線防護上なんらかの対策が必要になるまでには十分な時間的余裕はある。事故発生当初に於いて、限られた数の試料の分析によって ^{90}Sr の汚染が ^{137}Cs と同程度であることを確認した場合には、少なくとも1年半程度は ^{90}Sr - ^{90}Y について考慮しなくても良くなる。その間にそれ以上の内部汚染を防ぐ対策を立てれば良いのである。1年余という猶予期間は、 ^{90}Y の生物学的半減期が ^{137}Cs と同じ110日としてもほとんど変わらない。

III.2 ^{134}Cs

福島原発の事故では ^{137}Cs とほぼ同量の ^{134}Cs の放射能が検出³⁾された。藤原ら¹¹⁾によれば ^{134}Cs と ^{137}Cs の比は広い範囲にわたる測定点で0.91であったと報告されている。 ^{134}Cs はウランやプルトニウムの核分裂ではほとんど生成しない。それは質量数134の壊変系列の中で、親に当たる ^{134}Xe が安定同位体であるため親核種からの流れ込みが遮られるからである。 ^{134}Cs の起源は長年の原子炉の運転で核燃料の中に溜まった安定核分裂生成核の ^{133}Cs の(n, γ)反応しかありえない。従って、 ^{134}Cs の生成量は核燃料の燃焼記録と炉内中性子束によって変わってくる。この反応経路に基づいて ^{137}Cs に対する ^{134}Cs の比を概算すると次のような式になる。

$$\frac{^{134}\text{Cs}}{^{137}\text{Cs}} = \frac{\alpha_3}{\alpha_7} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_4 T} + \frac{\lambda_4}{\lambda_4 - \phi \sigma_n} (e^{-\lambda_4 T} - e^{-\phi \sigma_n T})}{1 - e^{-\lambda_7 T}} \quad (14)$$

ここで、 σ_n は ^{133}Cs の中性子捕獲断面積29 b (10^{-24}cm^2)、 ϕ は炉内中性子束、 λ_4 と λ_7 はそれぞれ ^{134}Cs と ^{137}Cs の壊変定数、 T は核燃料の燃焼時間である。(14)式の中で変数は T と ϕ であり、現実的な運転状況として、 $\phi = 5 \times 10^{12} \sim 1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ 、 $T = 1 \sim 10$ 年を想定すると、(14)式の値は0.044~2.39の間で変動する。両者がほぼ等しい条件は、 $\phi = 3 \times 10^{13}$ 、 $T = 10$ 年で0.90、 $\phi = 5 \times 10^{13}$ 、 $T = 3$ 年で1.06のあたりに現れる。

外部被曝を問題にする場合には、半減期が2年と短い ^{134}Cs の寄与は無視して良いが、内部被曝ではそうは行かない。(4) - (7)式を使って増倍係数を計算すると、1年目で被曝量は26.5、2

年目で最大の31.1となる。さらに ^{134}Cs の E_d は β 、 γ 併せて1.73 MeVと ^{137}Cs の2倍近くになり、(11)式で計算するとTable 2及びFig. 3に示したように、放射線損傷の大きさは、最大になる2年目で1.5倍と ^{137}Cs と同等の放射線損傷をもたらす結果になって、無視するわけにはいかないことがわかる。

事故当時、専門家の間では ^{134}Cs の存在を危惧する声も聞かれた。まさに卓見と言うべきである。 ^{134}Cs の存在がここまで大きくなったのは、 ^{134}Cs が体外に排出される前に体内で崩壊する割合が ^{137}Cs より1桁大きくなるためである。このことは、従来あまり気にしていなかった比較的短寿命の核種の影響も考慮する必要があることを示している。

上に述べたように、 ^{134}Cs と ^{137}Cs は炉内でほぼ同量発生していることが確かめられ、 ^{137}Cs による内部被曝が問題になるケースでは、 ^{134}Cs による被曝も無視できなくなることがわかる。場合によっては数ヶ月の内に ^{134}Cs の摂取を断ち切る必要が生じることもありうる。そのような場合に備えて、事故発生後 j 日経過後に摂取を断ち切った場合の増倍係数 f_a を計算する式を与えておく。

$$f_a^1 = \frac{\lambda}{\Lambda} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{1 - e^{-j\lambda}}{1 - e^{-\lambda}} - \frac{e^{-j\lambda} - e^{-j\Lambda}}{1 - e^{-(\Lambda-\lambda)}} \\ - \frac{(1 - e^{-(m-j)\Lambda})(e^{-j\lambda} - e^{-j\Lambda})}{1 - e^{-(\Lambda-\lambda)}} \end{array} \right\} \quad (15)$$

(15)式の右辺の中括弧の中の第3項は、 j 日をもって汚染食品の摂取を断ち切ったあと、1年の残りの期間、体内に残存している放射能による被曝量に該当する。

この式の使い方を示すと、事故が発生したら、まず ^{134}Cs と ^{137}Cs の存在比を測り、 ^{134}Cs の方が高かったら、(15)式を使って ^{134}Cs について予想される放射線損傷が ^{137}Cs を上回る時期を確認し(Fig.3の挿入図参照)、それに合わせて汚染食品の廃棄を徹底するのに役立てるのである。ちなみに ^{134}Cs が ^{137}Cs の2倍量存在する場合、 ^{134}Cs で汚染された食品の摂取を3ヶ月で断ち切った場合の Ω/Ω_0 は0.80、6ヶ月では1.46、1年では2.54と計算される。

Table 2 Amplification factor and relative radiation dose for ^{134}Cs .

Year	f_a	Ω/Ω_0	Day	f_a	Ω/Ω_0
1	26.51	1.27	10	1.18	0.048
2	31.06	1.49	20	2.33	0.094
3	23.04	1.10	30	3.45	0.140
4	16.53	0.792	40	4.56	0.184
5	11.81	0.565	50	5.66	0.232
7	6.02	0.288	60	6.73	0.274
10	2.19	0.105	70	7.78	0.315
15	0.408	0.0196	80	8.82	0.358
			100	10.82	0.439
			120	12.72	0.516
			150	15.59	0.632

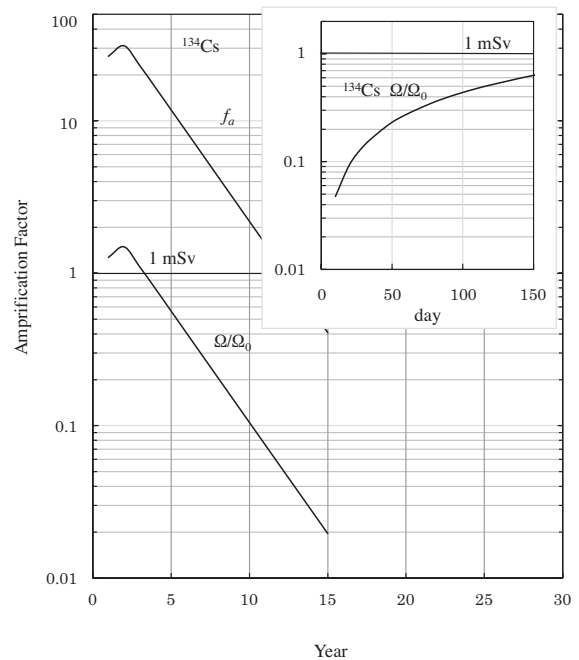


Fig. 3 Amplification factor f_a and radiation damage of ^{134}Cs relative to that of ^{137}Cs . The inserted figure shows the relative radiation damage for the case of intake of ^{134}Cs in the early stage.

III.3 ^{239}Pu

幸いなことに福島第一原発事故では ^{239}Pu の漏出は事実上無視できることがわかった³⁾。 ^{239}Pu が飛散するとすれば、核実験以外ではチェルノブイリのように原子炉本体が爆発して核燃料の一部が外部に飛び散るか、テロによる意図的なバラマキが行われた場合しか考えられない。プルトニウ

ム燃料は酸化物を焼き固めた形状になっており、水に放り込んでもほとんど溶けずにそこに沈殿している。したがって、口から取り込むことはまずあり得ない。また、土壌中の ^{239}Pu が農作物に移行する割合も極めて小さいという報告¹⁰⁾があり、考える ^{239}Pu の侵入経路は、大気中に浮遊するプルトニウムの微粉末を呼吸器を通して吸い込むことである。そのため、プルトニウムにおいて危惧される放射線障害は肺に沈着した ^{239}Pu によって惹き起こされる肺がんである。

^{239}Pu の微粉末はいつまでも大気中に止まっておらず、比較的短時間の内に地上に沈着するので、プルトニウムの吸入は飛散直後に集中して起こると考えてよい。したがって、呼吸器系を通して ^{239}Pu を吸入し続ける期間はたかだか10日程度とみなせばよいであろう。 ^{239}Pu の α 線エネルギーが 5.2 MeV、放射線荷重係数 W_R を 20 として (11) 式によって相対的な放射線損傷を求める。

^{239}Pu の物理半減期は 2 万 4 千年である。生物学的半減期については、エアロゾルの径の大きさ、プルトニウムの化学形、その他の要因によって 30 倍ものバラツキがあり、その値を絞り込むことは困難であると報告¹⁰⁾ されているが、50% 程度の誤差範囲で肺から血中への移行の半減期が 500 日ないし 1000 日¹⁰⁾ というところが信用できそうである。ここでは 1000 日を採用することにする。

ここでの目的には前節の (15) 式を $m\lambda \ll 1$ という条件のもとに使うことができ、

$m = 365$ 、 $j = 10$ として

$$f_a^1 = \left(\frac{\lambda}{A}\right) \left\{ j - \frac{e^{-(m-j)A}(1-e^{-jA})}{1-e^{-A}} \right\} \quad (16)$$

が得られる。2 年目以降に対しては

$$f_a^n = f_a^1 \left(1 - e^{-(n-1)m\lambda} \right) \quad (17)$$

が導かれる。 ^{137}Cs と同じベクレル数の ^{239}Pu を 10 日間取り込んだ時の相対値 Ω/Ω_0 を Table 3 と Fig. 4 に示す。

被曝量は 1 年目に ^{137}Cs の 72 倍となった後は、生物学的半減期にしたがって減少する。言い換えれば、5 年間に 5 mSv の制限を守るためには、総吸入量を 15 Bq に抑えなければならないということである。これまでなんとなく手の打ちようがないと思っていた ^{239}Pu が、要注意ではあるが、他

Table 3 Amplification factor f_a relative radiation dose Ω/Ω_0 and activity q remaining in the human body relative to the initial intake for ^{239}Pu .

Year	$f_a (\times 10^{-4})$	Ω/Ω_0	q
1	2.51	71.6	7.80
2	1.95	55.6	6.06
3	1.51	43.0	4.70
4	1.17	33.3	3.65
5	0.912	26.0	2.84
6	0.708	20.2	2.20
7	0.550	15.7	1.71
8	0.427	12.2	1.33
9	0.332	9.46	1.03
10	0.258	7.35	0.80
15	0.0728	2.07	0.226
20	0.0205	0.58	0.064
25	0.0058	0.165	0.018

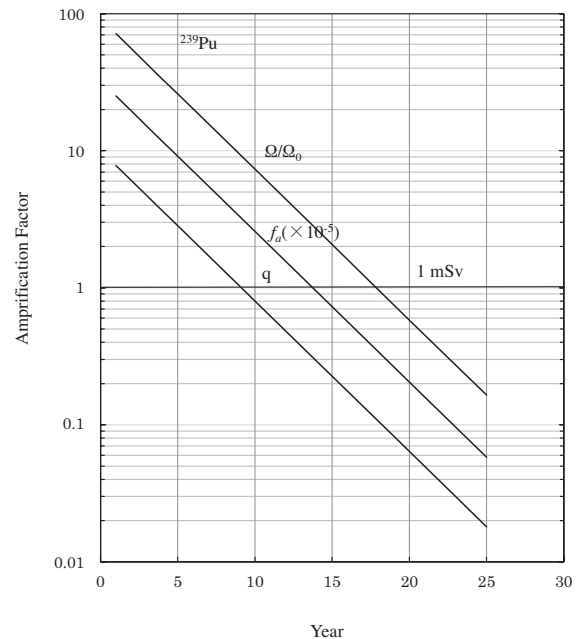


Fig. 4 Amplification factor f_a and remaining factor q besides relative radiation damage Ω/Ω_0 for ^{239}Pu . The sum of these three numbers for the first year equals the number of days of the intake of ^{239}Pu .

の β - γ 核種に比べて際立って危険であるとは言えないことが確かめられたのは収穫であった。これはひとえに ^{239}Pu の生物学的半減期が比較的短いことと、プルトニウムの大気汚染を短期間と見積

もったためである。特に後者については、被曝量が直接摂取日数に比例するので、今後の精査が重要になる。

半減期が極端に長い²³⁹Puの体内汚染の場合には、大部分の²³⁹Puはそのまま体内に残っており、体内で壊変する原子数は全体の 10^{-4} 程度にしか過ぎない。マンハッタン・プロジェクトの作業員の被曝状況の調査にしても、体内に残存するプルトニウムの量とガン発生状況との関連を調べる形になっており、疫学的調査に止まっている。したがって、実際の被曝量と残存放射エネルギーとの定量的な関連を明らかにすることは重要である。

1年後に残存する放射能の初期摂取量に対する割合は

$$q_1 = e^{-(m-j)A}(1 - e^{-jA})/(1 - e^{-A}) \quad (18)$$

で与えられ、2年目以降 ($n > 1$) については

$$q_n = q_1 e^{-(n-1)mA} \quad (19)$$

が導かれる。(16) と (18) の両式から

$$\left(\frac{A}{\lambda}\right) f_a^1 + q_1 = j$$

が成り立つこと、即ち最初の10日間に摂取した放射性核種の量が確かに保存されていることが保証され、このことから今回の理論の展開の正しさが裏付けされると言える。ちなみに、初年度の終わりに体内に残っている放射能は全体の22%で残りの78%は壊変せずにそのまま体外に排出され、体内で壊変したのは0.025%に過ぎず、全被曝量は総量で680 Bqの吸入に対し72 mSvになる。²³⁹Puについて、被曝量とともに体内に残存する放射能も Fig. 4 に図示してある。

マンハッタン・プロジェクトにおいてプルトニウムの化学分離中に硝酸プルトニウムの蒸気を吸入する事故が発生し、26名の作業員が被曝した。最大の汚染(プルトニウム負荷量)は7000 Bqにもなり、50年にわたる経過観察で、1名が肺がんで死亡した他、プルトニウムとの関連が疑われる骨肉腫の発症が1例認められたと報告^{12), 13)}されている。今回の手法を適用して、7000 Bqの負荷量に対する被曝量を計算すると最大でおよそ3 Svであったと見積もられ、疫学的調査とも合致する結果となっている。

III.4 ³H

最後に³Hについて考える。³H(半減期14.3y)は100%β崩壊であり、その壊変エネルギーは18.6 keVと非常に低い。そのような場合、個々の生体分子の受けるダメージは二重螺旋の一方が切断されるとか、1個2個の塩基が切り離される程度の単純な損傷に止まる場合が圧倒的であると考えられる。そのためアニーリングによって元の分子に戻る確率が非常に高いことが予想される。このことが³Hが深刻な障害を引き起こすことはないであろうと考える根拠になっているが、ここでは³Hと他の放射線との間の修復度の違いは無視して、与えられるエネルギーの総量のみを問題にすることにする。ここで問題になるのは³Hの生物学的半減期である。ICRPの報告⁶⁾によれば、³Hの生物学的半減期については97%を占める主成分と3%の第二成分が認められ、10日と40日であるとされている。したがって、ここではそれぞれの成分について増幅度 f_a を計算した上で、両者の加重平均を取ることにする。

Fig. 5に示したように、³Hの f_a の最大値は0.72であり、これと壊変エネルギー18.6 keVの1/3の $E_d = 6.2$ keVを(11)式に代入すると、¹³⁷Cs相当にして1 mSvの被曝は9万7千Bq/Lとなる。海洋投棄の際には投棄の瞬間に少なくとも10倍以上の希釈が起こると考えられるので、10 mSv/L(¹³⁷Cs_{eq})のレベルの放射能の放流を行ってもバックグラウンド・レベルに抑えられるはずであり、放出時の許容放射能レベルは97万Bq/Lとなって放流に対するハードルはかなり低くなることになる。

海産物に対しては、放射能の濃縮の問題がしばしば問題にされてきたが、これまで具体的な対策が取られたことはない。もしここで述べたように、高濃度トリチウムの海洋投棄が許されるとすれば、トリチウムの濃縮の問題は避けて通れなくなる。幸いなことに今回開発した手法を適応すれば、比較的簡単に濃縮係数 q を計算することができる。結果を示すと、1年目に対して

$$q_1 = \sum_{i=0}^{m-1} e^{-iA} e^{-(m-i)\lambda} \quad (20)$$

$$= \frac{e^{-m\lambda} - e^{-m\lambda}}{1 - e^{-(A-\lambda)}}$$

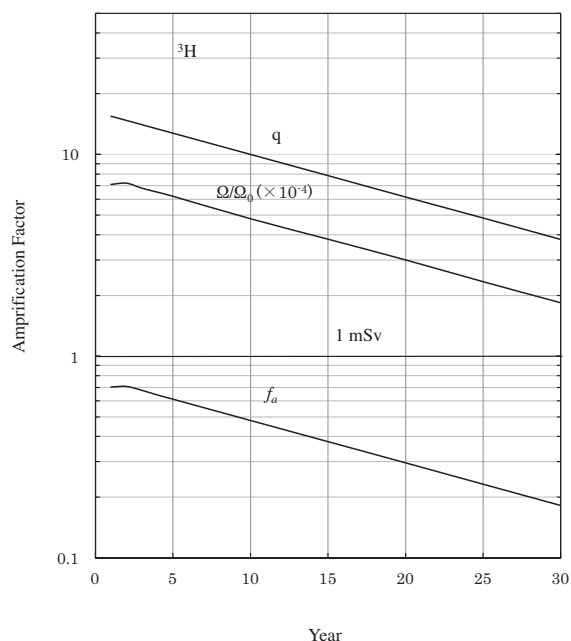


Fig. 5 Amplification number f_a and concentration factor q besides relative radiation damage Ω/Ω_0 for tritium

Table 4 Amplification factor f_a relative radiation dose Ω/Ω_0 and concentration factor for ^3H

Year	f_a	$\Omega/\Omega_0 (\times 10^4)$	q
1	0.703	7.10	15.46
2	0.708	7.15	14.74
3	0.677	6.48	14.04
4	0.642	6.48	13.37
5	0.612	6.18	12.74
10	0.480	4.85	10.00
15	0.377	3.81	7.85
20	0.296	2.99	6.15
25	0.232	2.34	4.84
30	0.182	1.84	3.79

2年目以降に対しては

$$q_n = q_1 e^{-(n-1)n\lambda} \sum_{i=0}^{n-1} e^{-jn(\lambda-\lambda)} \quad (21)$$

$$= \frac{q_1 e^{-n\lambda} (e^{-n\lambda} - e^{-n\lambda})}{1 - e^{-n(\lambda-\lambda)}}$$

と導かれる。得られる濃縮係数は1年目がもっとも高く、14.2倍、2年目は13.6倍で、以後 ^3H の物理半減期にしたがって減少していく。Fig. 5には ^3H についての増倍係数 f_a と濃縮係数 q をプロッ

トしてある。またそれぞれの数値はTable 4に与えてある。

この結果を支配するのは生物学的半減期であって、ここでは人体に対する値を用いたが、生物種によっては異なる値になることも予想される。逆に、着目する海産物についての濃縮係数が計測されれば、その海産物に対する生物学的半減期が求められることになる。海産物を積極的に摂取する我が国では放射能の海洋投棄に対する許容線量にこの濃縮の問題をどう反映させるかは重要な問題であるが、考慮すべき諸因子には不確定な点がありすぎるのでここではこれ以上触れず、単に指摘するだけにしておく。

とにかく今回の解析によって放射能の海中生物への濃縮の機構が、複雑な生物学的要因に踏み込むことなく、単純な物理的因子に凝縮された形で説明できることが一応示された。しかし一連の核種について展開してきた内部被曝の解析で、得られた結果が正しいか否かを検証すべき実測データは存在しない。魚介類へのトリチウムの濃縮の問題を考察する段になって初めて濃縮係数という、理論値と比較すべき実測データが利用できる可能性が得られたのである。

なるべく人間に近い動物を使って放射能の濃縮係数を測定すれば、当該放射能の生物学的半減期を従来の手法よりはるかに高い信頼度で正確に求めることが可能になるばかりでなく、濃縮に関わる複雑な生物学的現象をどこまで単純な物理的手法で置き換えることが許されるのかを検証できる可能性がある。実験は非常に難しく、要求に答えられる制度が得られる可能性はかなり低いことが机上計算では予想されるが、もし実現すれば波及効果は大きい。その結果は、当然残存放射能と相補的な関係にある体内被曝量の評価法の検証にもつながる筈である。

IV. 結語

今回開発した手法は、従来曖昧な状態で放置されてきた問題に対して、理論的な根拠を持って回答を与え、これによって、人々の理由のない不安や怖れを取り除き、内部被曝の危険度の限界そして対応策を明確に示すものである。今回展開した内部被曝の評価法を検証すべき実測データが存在

しないため、その正しさを実証することはできない。しかし、事情の異なる様々な核種に適用して破綻せず結論が導き出されたことによって、間接的に正当性を示すことができたと考えている。中でも、4.4節で n 年後の濃縮係数を与える(19)式に対して、(18)式の m を nm に置き換えた計算を行っても同じ数値が得られたことは、演算の仕方を変えても矛盾が生じないことを示しており、相当強い説得力を持つと思われる。

内部被曝の問題を考えるに当たって、被曝量ではなく被曝によって受けた放射線損傷の大きさに着目することで、重要さを指摘されながらこれまで事実上触れることのなかった ^{90}Sr とトリチウムという二つの核種、そして今まであまり注目されていなかった ^{134}Cs による被曝の実態に迫ることができた。また、これまで誰もが触れることすら諦めていた ^{239}Pu についても、内部汚染の実態についてある程度の目処をつけ、通常の β - γ 核種と同様に扱うことができることを示すことができた。

特に ^{90}Sr については、原発事故由来の汚染による被曝は時間の経過と共に、共存する ^{137}Cs のそれに比べて最大で15倍になるという結論が得られた。しかしながら、そのような状態に陥るまでには1年余の余裕があり、その間に ^{90}Sr による食品の汚染を完全に除去できれば、災害を防げることを示している。このような時間軸に沿っての内部被曝量の変化を正確に辿れることで、膨大な人手と設備、機材が必要となる ^{90}Sr に対するモニタリングの重圧を軽減できるであろう。そのような機能は預託実効線量の計算式には期待できないと思われる。

^{134}Cs による内部被曝については、損傷は事故後の初期に集中する。 ^{134}Cs と ^{137}Cs で汚染の程度が同程度であれば、ダメージの大きさは1年目、2年目は両者の間で同程度になり、その後 ^{134}Cs の被害は急激に減少していく。しかし、 ^{134}Cs と ^{137}Cs による汚染が同程度になるとは限らず、場合によっては前者が後者より数倍多くなることもありうることは想定しておかねばならない。その場合には ^{134}Cs によって汚染された食品の廃棄対策を月単位で発動することが有効になってくる。

^{90}Sr と ^{134}Cs の汚染については場合によっては継続する内部汚染を断ち切る必要が出てくること

が予想される。しかしその場合でも、時間軸に沿って計画的な防護対策を立てれば事故後の混乱の中にあっても、防護活動に十分な余裕が生まれるであろう。内部被曝の時間的推移を数学的に解き明かしたことで、将来を見据えた防護対策を立てることが可能になると期待される。その意味で、この論文は、ICRPの線量評価法に欠けていた基礎データを供給することによってICRPの評価法を補強するものと位置づけられるであろう。

事実上除染が不可能で、結局は希釈して海に流すしか方法がないトリチウムについては、 ^{137}Cs による放射線損傷と比較することで、妥当な希釈濃度を定め得ることを示した。それと並行して、海中における魚介類の体内でのトリチウムの濃縮という現象も同列に計算できることを示したが、その結果をどのように海中投棄に対する許容度に反映させるかは本稿では考慮していない。この問題は、専門家による今後の検討に委ねたい。

以上で今後我々が今後遭遇するかもしれない核種は網羅したと思われるが、よしんばここで見逃した核種が現れるとしても、その生物学的半減期が与えられさえすれば、今回披瀝した手法によって、直ちに答えが用意されはすである。

謝辞

本稿を執筆するに当たって貴重な助言をいただいた古川路明名古屋大学名誉教授、有益な議論をして頂いた横山明彦金沢大学教授、上杉正樹博士、藤原守博士に感謝の意を表します。

引用文献

- 1) S.Suga, R.Ichikawa, "On the Revision of the Index for Intake Restriction of Food and Drink in the Guiding Principle of Disasters", *Health Phys.* **35**, No.4, 449(2000) [in Japanese].
- 2) H.Baba "On the Safty Standard for Food", *Radiochem. News.***25**, 39 (2012) [in Japanese].
- 3) Nuclear Emergency Response Headquarters, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, and Forestry and Fisheries, Research Council Secretariat, Ministry of Agriculture, Forstry and Fisheries, "Report on the Result of Investigation and

- Research on the Distribution of Radioactive Materials released by the Accident of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Reactors, and Mapping of Distribution of Radiation Doses etc.”, Vol.1, Nuclear Energy Response Headquarters Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (2012) [in Japanese].
- 4) E.Browne, J.M.Dairiki, R.E. Doebler, E.A.Shihab-Eldin, L.J.Jardine, J.K.Tuli, A.B.Buyrn edited by C.M.Lederer and V.S.Shirley “*Table of Isotopes*” SEVENTH EDITION, John Wiley & Sons, Inc. (1978).
 - 5) G.Pfenning, H.Klewe-Nebenius, W.Seelmann-Eggebert “*Karlsruher Nuklidkarte*” Karlsruhe (1998).
 - 6) ICRP Publication 78: “Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers, Annals of the ICRP Volume 27/3-4, Replacement of ICRP Publication 54”, Stratford Books (1998).
 - 7) K.Noguchi, “A Story of Radioactivity”, New Japan Publishing Co. (2011) [in Japanese].
 - 8) S.Asai, M.Okano, Y.Kameo, “Analysis of ^{89}Sr and ^{90}Sr in the Stagnant at the Turbine Building of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station”, *Radiochem. News* **25**, 25 (2012) [in Japanese].
 - 9) K.Saito et al., “Detailed deposition density maps constructed by large-scale soil sampling for gamma-ray emitting radioactive nuclides from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident”, *J. Environ. Radioact.* **139**, 308 (2015).
 - 10) S.Uchida, K.Tagami, N.Ishii, “Distribution and Movement of Radioactive Nuclides in Environment 1. Movement Characteristics of radioactive Nuclides in Soil”, *J. At. Energy Soc. Jpn.* **53**, No.9, 2, 309 (2011) [in Japanese].
 - 11) M.Fujiwara and I.Tanihata, “What we learned from the large-scale soil sampling for radioactive nuclide released from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident”, to be published.
 - 12) J.C. Moody, G.N. Stradling, A.R Britcher, “Biokinetics of Three Industrial Plutonium Nitrate Materials: Implications for Human Exposure”, *Radiat. Prot. Dosim.* **53**, Nos.1-4, 169 (1994).
 - 13) G.N. Stradling, J.C. Moody “Use of animal studies for assessing intakes of inhaled actinide-bearing dusts” *J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles* **197**, 2, 309 (1995).

Abstract

A method developed to evaluate the magnitude of internal radiation exposure for ^{137}Cs and ^{131}I was applied to four nuclides, ^{90}Sr , ^{239}Pu , ^3H and ^{134}Cs which were important in the accident of the Fukushima Nuclear Power Plant NPP. We can trace the internal exposure as a function of elapsed time, so that it is possible to set up more reliable measures for radiation protection by reinforcing the ICRP approach. Furthermore, we can deduce the amount of activities remaining in the body and those expelled out of the body separately. Acquired information opens to the aspects not attempted ever, such as more reliable determination of the biological half-life or concentration of activities in the sea foods.

ニュース

大阪大学放射線科学基盤機構の発足

豊嶋 厚史、篠原 厚 (大阪大学放射線科学基盤機構)

本年4月1日に大阪大学に放射線科学基盤機構が発足しました。本機構は、部局を横断して放射線科学の新たな研究教育や課題解決を機動的に行えるよう、全学の放射線関連施設を一元化する組織です。専任教職員10名、14関連部局からの兼任教職員126名(平成30年6月1日現在)を有する組織として活動を開始しました。

本機構は、放射線管理、放射線教育、放射線科学を柱とする3部門、そしてそれらを推進する中心施設である附属RIセンターから成ります(図1参照)。1) 全学体制による放射線管理の充実と合理化、2) 全学的な放射線科学教育プログラムの構築ならびに教育・人材育成の推進、3) 学内の部局横断研究体制の構築、国内外の関連機関との連携強化ならびに産学官共創による次世代の革新的イノベーション創出を目指しています。

現在、概算要求「放射線科学基盤機構設置による新規医療イノベーションの推進」(平成30-34年)が進行中であり、「アルファ線核医学治療法開発」を中心に、学内の加速器施設や医学部付属病院とも連携して産学共創による新規医療応用を推進しています。

それぞれの部門と附属センターの役割は以下の通りです。

放射線管理部門

阪大が有する放射性同位元素使用施設ならびに核燃料物質使用施設の各管理室と連携し、全学の放射線安全管理の総括に関する業務を行っています。安全文化の醸成やしっかりとしたリスク管理を可能とする全学的な安全管理体制は、全国の大学に先駆けた試みです。

放射線教育部門

国際的な教育拠点を目指して、学内外で放射線・原子力教育、人材育成を進めています。IAEAとの連携による医療人材育成プログラムを進めるほか、保健学科が推進してきた医学物理士養成プログラムなどの教育プログラムを部局横断的に推進します。また、全学の放射線教育訓練、放射線関連アウトリーチ活動などのミッションを持っています。

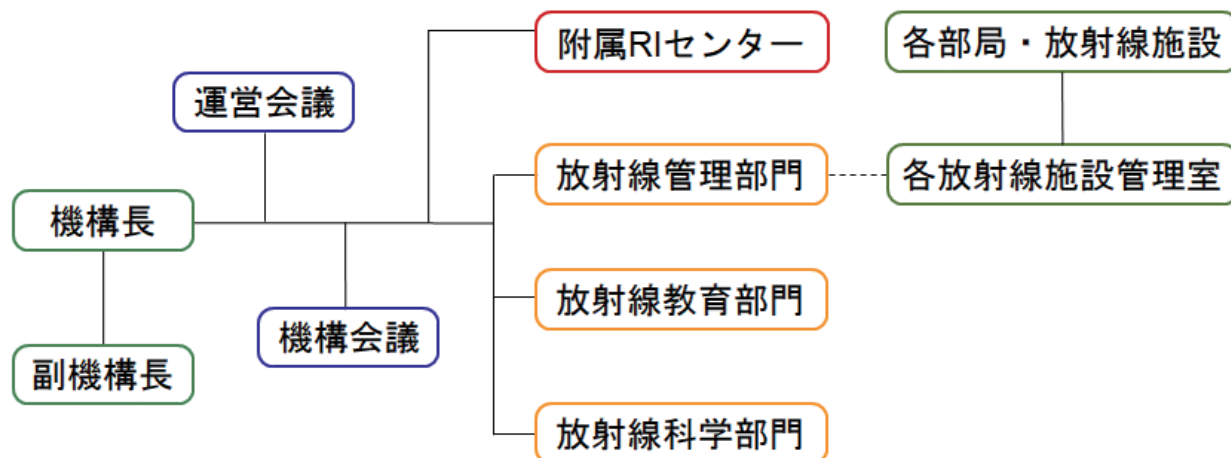


図1. 放射線基盤機構の組織図

放射線科学部門

産学官連携室、施設維持共同利用管理室、および推進する各研究プロジェクトが中心となり、放射線関連研究を部局横断的に進めます。放射線関連研究の産学共創、共同利用などの窓口となります。研究プロジェクトとしては、現時点で医学系研究科、理学研究科、核物理研究センターと連携して「アルファ線核医学治療開発プロジェクト」が進められています。今後、新規研究プロジェクトを随時立ち上げてゆきます。

附属ラジオアイソトープ総合センター

放射線科学基盤機構附属ラジオアイソトープ総合センターは、放射性同位元素等の安全管理や施設の共同利用を通して、放射性同位元素にかかわる教育・研究の進展に資する事を目的としています。そのため、機構内のすべての部門と一体となっており、本学の放射性同位元素等の安全管理に必要な共通業務を行うとともに、施設を大阪大学内外の共同利用に供します。

「大阪大学放射線科学基盤機構 発足記念行事」

去る8月1日に大阪豊中市の千里ライフサイエンスセンター山村雄一記念ライフホールにおいて、本機構の「発足記念式典・記念シンポジウム」を開催致しました。当日は御来賓の方々をはじめとして全国各地から延べ218人の方々のご列席下さり、盛大に開催することができました。記念式典では、八木康史 阪大理事副学長による式辞ならびに西尾章治郎 阪大総長の祝辞を頂きました。また、ご来賓として文部科学省高等教育局国立大学法人支援から淵上孝 課長の、さらに大勢の皆様を代表して大阪大学前総長の平野俊夫 量子科学技術研究開発機構（量研機構）理事長、齊藤直人 J-PARC センター長、中西友子 原子力委員会委員が御挨拶下さいました。最後には篠原厚 機構長が本機構の概要を説明し、閉会と致しました。

記念シンポジウムでは、3つのセッションを行いました。最初のセッションでは、平野俊夫 量研理事長に「がん死ゼロ健康長寿社会を目指して」と題した特別講演をお話し頂きました。非常に力強いご講演で、量研機構での研究内容を総合

的にご紹介いただきました。次のセッションでは、放射線関連科学の最前線として三名の先生方にご講演頂きました。まず、阪大産業科学研究所の吉田陽一 教授による「産研における量子ビーム研究の展開」、そして理化学研究所の羽場宏光 博士による「理研における RI 製造応用～新元素の化学から核医学の診断・治療まで～」、最後に阪大工学研究科の北田孝典 教授による「原子力人材育成プログラム」と、放射線科学をリードする先生方に、多様な放射線関連研究についてお話し頂きました。最後のセッションでは、本機構の中心研究課題であるアルファ線核医学治療開発の現状と展望について、四名の先生方にご講演いただきました。まず、招待講演としてハイデルベルグ大学の Frederik Giesel 教授に「PSMA-ligand theranostics: from imaging ($^{68}\text{Ga}/^{18}\text{F}$) to therapy ($^{177}\text{Lu}/^{225}\text{Ac}$) and its clinical impact」とのタイトルでお話頂きました。アルファ線核医学治療のパイオニアである Giesel 教授が、非常にインパクトのある治験結果を次々とお示しになった圧巻のご講演でした。その後、世界の動向について阪大医学系研究科の畑澤順 教授による「国際原子力機関 IAEA とアルファ線核医学治療」、国内の現状と展望について、量研機構・放射線医学研究所の東達也 博士に「アルファ線核医学治療 国内の現状と展望」、阪大理学研究科の深瀬浩一 教授に「アルファ線核医学治療開発に向けた大阪大学の戦略と現状」のタイトルでご講演頂きました。アルファ線核医学治療法開発に関する、国内外そして阪大での状況を分かりやすくご講演頂きました。さらにシンポジウムの後、記念祝賀会を同センター千里ホールにおいて開催しました。柴田徳思 名誉教授の乾杯の音頭で始まり、延べ140名以上の方がご参加下さった非常に盛況な祝賀会となりました。

本記念式典は、放射線科学に係わる多くの方々のご列席下さり、大盛況のうちに終える事ができましたが、これからの本番です。記念行事を通じて、関係者からの大きな期待を感じ、その責任を実感しました。今後とも学内外の関係者、関係機関の皆様方にご支援、ご協力いただけますよう、よろしくお申し上げます。



図2. 記念式典での写真

ニュース

原子炉の近況（京都大学研究用原子炉 KUR）

高宮 幸一（京都大学 複合原子力科学研究所）

京都大学複合原子力科学研究所（2018年4月1日に「京都大学原子炉実験所」から改名）では、研究用原子炉 KUR と臨界集合体実験装置 KUCA の2基の原子炉施設を保有している。この両方の施設は原子力規制委員会が策定した新規規制基準への適合確認のため2014年の春から運転を停止していたが、KUCAは2017年6月に、KURは同年8月に審査、検査等を終了し、約3年ぶりとなる利用運転の再開を果たした。本稿では、放射化分析やRIの製造・利用等の目的で多くの本学会会員の方々に利用されているKURの現状について、運転、実験設備、共同利用に関する状況を紹介する。

KURの運転の状況

前述のとおりKURは2017年8月に約3年ぶりに利用運転を再開し、2018年2月まで運転を行った後に定期検査期間に入っている。この間、重水設備のトラブルや排気システムの不具合等によりKURの運転やホットラボ施設の使用ができない期間が生じ、共同利用実験を予定されていた方々に十分な実験研究の機会を提供することができなかった。2018年度は安定した利用運転を行うために、発生した不具合の再発防止を中心とした入念な点検・保守を行っていることもあり、当初の計画より定期検査期間が長くなり、本稿執筆時点では2018年8月21日に利用運転が開始される予定となっている*。基本となる運転パターンは2017年度と変わらず、運転週の火曜日11時から木曜日10時までを1MWで運転し、5MWに出力を変更して16時まで運転を行う（1MW 47H + 5MW 6H）。月曜日が休日となる場合には水曜日に起動し、1MW 23H + 5MW 6Hの運転となり、5MWで5時間の単日運転を行う週も計画されている。RI製造などを目的とした利用者からはより長時間の5MW運転の要望があり、長時

間の5MW運転を組み込んだ効率的な運転パターンの検討が行われている。5MWでの運転では1MW運転時と比べて多くの運転班員を必要とするため、2018年度の運転計画では要望に応えることができていないが、研究活動の活性化のために継続した検討が行われているところである。

KURの実験設備

KURには中性子放射化分析やRI製造等を目的とした中性子照射設備が複数整備されている。比較的小さい試料の中性子照射には、ポリエチレン製のキャプセルを用いて炉心近傍に送る圧気輸送管照射設備や、アルミニウム製のキャプセルを用いて炉心中央に送る水圧輸送管照射設備が用いられる。比較的大きな試料の中性子照射には、傾斜照射孔やB-2実験孔照射装置が用いられる。これらの照射設備は多くの共同利用研究者に利用されており、今後も継続して運用を行う予定である。これらの中性子照射設備以外にも様々な実験設備が設けられており、以下では近年整備された実験設備について紹介する。まず、B-1実験孔には低速陽電子ビームシステムが設置され、材料分析研究等での利用が始まっている。この装置では、B-1実験孔内に配置されたカドミウムターゲットの中性子捕獲反応・ガンマ線放出に伴う対生成反応で生じる陽電子をビームとして引き出すことができる。このようにして取り出された陽電子ビームは、陽電子消滅分光法によって材料分析研究などに利用される。B-4実験孔にはスーパーミラー中性子導管設備が接続されており、炉室外の導管実験室に中性子を輸送して中性子イメージング等の実験に利用されている。B-4導管実験室では比較的高い熱中性子束（最大 5×10^7 n/cm²/s）が得られるため、静止画撮影や高速度ビデオカメラを利用した動画撮影を行うことができる。また、中性子ビームを用いた核データ測定等のオンライ

ン実験も行うことができる。E-2 照射孔では比較的大きな視野 ($\phi 15$ mm) での中性子ラジオグラフィ撮影が可能となっており、静止画や CT 画像の取得が可能となっている。これらの実験設備の一部は所内外の研究者によって共同で開発が行われたものであり、今後もこのような装置開発を促進し、KUR を利用した共同利用研究がさらに活性化することが期待されている。

共同利用の状況

京都大学複合原子力科学研究所の共同利用研究は毎年秋に翌年度の公募が行われており、2018 年度は通常採択として 120 件、プロジェクト採択として 104 件が採択されている。また、公募期間外の即時性の高い申請に対し、即時採択として本稿執筆時まで 2 件が採択されている。KUR の運転が再開された 2017 年度は、通常採択が 133 件、プロジェクト採択が 93 件、即時採択が 1 件の計 227 件が採択されており、KUR の運転のなかった 2016 年度においては、通常採択が 119 件、プロジェクト採択が 82 件、即時採択が 3 件の計 204 件が採択されている。2016 年度においては KUR の運転ができなかったため採択された共同利用研究の多くが実施できなかったが、近年の採

択件数の総数は 200 件強で推移している。前述の実験設備やその付属設備の一部においてはマシンタイムが逼迫しているものもあり、より効率的な実験研究を行うためにも、先に述べた KUR の 5 MW での運転時間の増加が望まれている。

最後に

KUR は新たな規制基準のもとでの運転と共同利用研究が再開され、多くの所外の利用者の方々には休止以前の状態に戻ったという印象を持たれていると推測する。そのような印象を持たれているとすれば非常に喜ばしいことではあるが、先に述べた運転班員の増員など、新たな規制基準のもとでの研究用原子炉の運用は再開前と比べるとより多くの労力を伴うものとなっている。研究所内においては研究活動の活性化に加え、安全管理の強化も目的とした組織改革が検討されており、より高度な共同利用研究の場を提供できるよう組織全体での変革に取り組んでいる。所外の共同利用研究者の方々には安全性向上のための取り組みへ協力していただくとともに、KUR の運転や実験設備の運用に対して積極的な提案をいただくことで、研究用原子炉を用いた研究の活性化を目指したいと考えている。

* 2018 年 8 月 21 日から KUR の利用運転が予定通り開始された。

ニュース

東北大学電子光物理学研究センターの近況報告

菊永 英寿（東北大学電子光物理学研究センター）

東北大学電子光物理学研究センターは3台の電子線形加速器と1台の電子シンクロトロンが設置されている、大学附置施設としては大型の加速器使用施設です。また、400弱の核種が使用できる非密封放射性同位元素（RI）使用施設も併設されています。これらの施設を用いて、核物理やビーム物理、物質科学、そして放射化学や核化学の研究が行われています。

当センターでは大強度電子線形加速器（出力9 kW）で加速した20-60 MeVの電子ビームを用いて、光核反応によりRIを製造しています。製造したRIは化学実験室（非密封RI使用施設）に搬送した後、化学分離等の処理を行い、様々な実験に使用します。これらのRIは当センターの共同利用・共同研究拠点活動や短寿命RI供給プラットフォーム制度（<https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~ripf/>）を通じて全国の研究者に利用されています。

大強度電子線形加速器について震災復旧後の4年間の利用状況を図1に示します。縦軸は実施したシフト数（1シフト：12時間）です。共同利用（所内）はセンター内の研究者が代表である実験、共同利用（所外）は共同利用として所外研究者が実施した実験、共同研究は企業との共同研究として実施した実験、RI-PFは短寿命RI供給プラットフォーム制度でRIを頒布した実験です。実施シフト総数は、少ない統計ですが順調に増えています。その内訳をみると、共同利用は内部利用、外部利用とも大きな変化はなく、平成28年度から始まった共同研究とRI-PFが増加の大きな原因となっています。研究課題としては、共同利用は光量子放射化分析、RI製造、検出器テスト、光核反応収率測定が主なテーマとなっており、共同研究とRI-PFでは核医学分野とライフサイエンス分野がほとんどを占めています。RI-PFでは施設側で化学分離を行い、ほぼキャリアフリーのRI

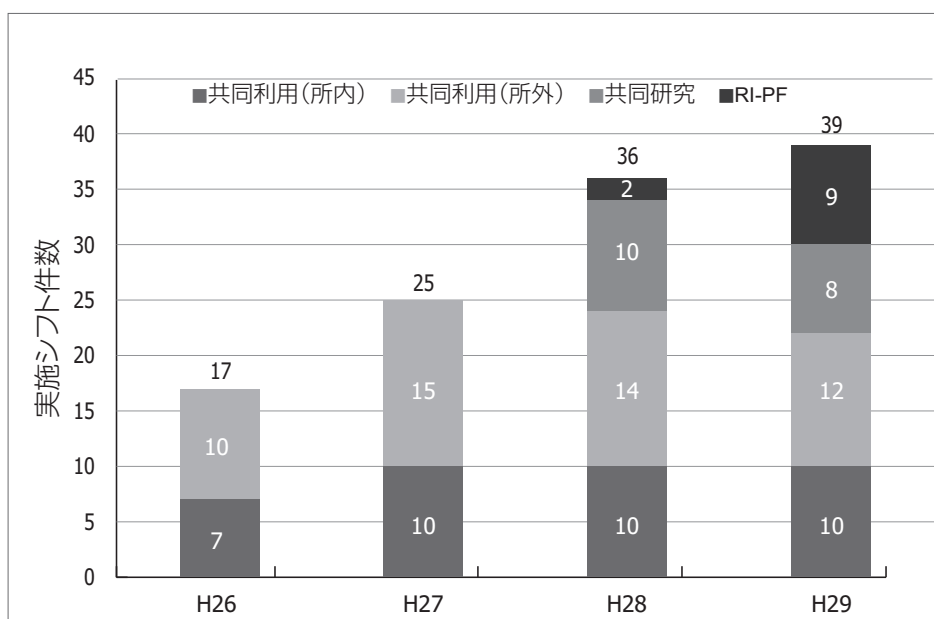


図1. 過去4年間の実施シフト数

として供給を行っているため、核化学・放射化学以外の研究者はこちらの制度を好んで利用しており、概ね好評です。

当センターの大強度電子線形加速器の利用方法は、共同利用枠と短寿命 RI 供給プラットフォーム枠が用意されています。共同利用枠の課題募集は年2回（現在は6月と12月）行われています。課題採択委員会を経て採択された課題は2年間有効であり、半年ごとにユーザーの実施希望時期に応じてマシンタイムの配分を決定しています。現時点では、迅速性を求めるユーザーに対応するため随時申込を受け付けています。ただし、随時申込の実験課題にはマシンタイムスケジュールの調整などが行われず、マシンタイムの優先的使用も行えないことになっています。申請時およ

びマシンタイム実施時には分野ごとの所内世話人がサポートいたしますので、遠慮なくお問い合わせください。センターの案内や募集については随時ホームページ (<http://hayabusa1.lns.tohoku.ac.jp/>) に掲載しています。短寿命 RI 供給プラットフォーム枠についても年2回の募集があります（放射化学第34号 p.44 の記事や上記ホームページ参照）。共同利用枠との違いは、共同利用枠がマシンタイムの配分を行うのに対して、短寿命 RI 供給プラットフォーム枠は RI 供給に限定している点にあります。電子光センターに来所して実験を行いたい場合は共同利用枠、RI を郵送で受け取りたい場合は短寿命 RI 供給プラットフォーム枠を利用するなど、都合の良い方をご利用ください。

コラム

ドイツ ヘルムホルツ研究所マインツ & スイス ポール・シェラー研究所滞在記

佐藤 哲也 (日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター)

筆者は、2017年5月末から12月末までの7か月間をドイツ ヘルムホルツ研究所マインツ、そして2018年1月から3月末日までの3か月間をスイス ポール・シェラー研究所で過ごす機会を得た。本稿では、本長期滞在について簡単に紹介するとともに、今後、海外の研究機関への留学等を検討している諸氏に向けた情報も盛り込んでみたい。

1. なにはなくともお金の話

今回の筆者の長期ヨーロッパ滞在は、ふたつの外部予算によって可能になった。ドイツ滞在には科研費に2015年度から新しく設けられた国際共同研究加速基金の国際共同研究強化、スイス滞在には、スイス科学基金 (Swiss National Science Foundation) の短期滞在プログラムを利用した。

国際共同研究強化は、「科研費に採択された研究者が半年から1年程度海外の大学や研究機関で行う国際共同研究。基課題の研究計画を格段に発展させるとともに、国際的に活躍できる、独立した研究者の養成にも資することを旨とする」というもので、応募年次の4月1日時点で36歳以上45歳以下の者が対象となる。応募にはすでに科研費に採択されていることが前提で、その採択テーマの成果の一層の発展のために国際共同研究が必須であることが求められる。自分の経験と他の採択者の話を総合すると、応募の時点で海外との協力関係があり、先方と話がついていることが重要視されているように感じた。この制度は、対象年代からわかるように、いわゆる中堅研究者を対象としているのがポイントである。滞在費と研究費のみならず、不在中の穴を埋める人件費までが予算に含まれる。現実問題として、任期が1年に満たない人員の手配は困難であるという問題はあるものの、中堅層が実績と経験をもとに国際共同研究における対等な関係を構築するという本種目の趣

旨は評価に値すると思う。なお、この人件費は、研究者に限らず、事務や学生の雇用にも使用できる。

一方のスイス科学基金については、受け入れ先から応募し、採択される必要があった。申請書類の一部を書いたものの、先方で書き直されたものはまったく原型をとどめておらず、科研費の応募書類とはまったくポリシーが異なっていることに驚いたのを覚えている。どうしても応募に際して受け入れ先の負担が大きくなるが、先方の協力が見込める場合は、こういった海外の外部予算の獲得も視野に入れるべきであると思う。

2. ヘルムホルツ研究所マインツ

本滞在申請の基課題は超重元素の第一イオン化エネルギー測定を目的としたものだったが、一連の研究成果のひとつに、原子力機構タンデム加速器に設置されたオンライン質量分離器 (JAEA-ISOL) 用の高効率・長時間安定運転可能なガスジェット結合型表面電離イオン源開発がある。マインツ大学が有する実験用原子炉 TRIGA には、ウランなどの中性子励起核分裂で生成する核分裂生成物の高精度質量測定や核分光のためにガスジェット ISOL (TRIGA-ISOL) が設置されており、これまで多くの研究成果をあげているものの、装置の安定性や効率に問題を抱えていた。今回、これまでのドイツ重イオン研究所 (GSI) やマインツ大との国際共同研究をきっかけに、この TRIGA-ISOL に我々の開発したイオン源をコピーすることになった。自分たちが開発した実験装置が、他の研究機関でも採用されるというのはなかなか感慨深い。我々もマインツ大学のグループがもつイオントラップ技術に興味があったこともあり、イオン化エネルギー測定のためのステップに位置付ける原子ビーム開発を名目に、技術交換と将来的な装置開発のためヘルムホルツ研究所マイ

ンツ (HIM) への滞在を決めた。

HIM は、ドイツの自然科学研究を推進するヘルムホルツ協会に所属するたくさんの研究機関のうち、基礎物理学研究を目的に設立されたもので、GSI とマインツ大学との共同運営という形でマインツ大学に設置されている。ライン川とマイン川の合流点にあるマインツは、ラインラント・プファルツ州の州都であり、ドイツ南西部に位置する。中世よりマインツ大司教の司教座聖堂の所在地であることからわかるように、大変古い歴史を持つ町である。このマインツの中央駅を挟んで、旧市街の反対側にマインツ大学がある。このマインツ大学は正式名称をヨハネス・ゲーテンベルク大学マインツといい、マインツ出身の活版印刷技術の発明者ヨハネス・ゲーテンベルクにちなんでいる。1477年に設立され神学部や医学部を含め現在11の学部がある。

HIM では、受入担当者である Ch. E. Düllmann 教授率いる超重元素研究グループの学生部屋に間借りし、新しいイオン源の立ち上げや、TRIGA-ISOL を用いたオンライン実験などの他、我々の JAEA-ISOL に新しく導入する予定のエアロダイナミックレンズ設計のための基礎データ取得などを行った。居室は前年に完成したばかりの建家であり、どれもこれも新品で、大変快適に過ごすことができた。よく言われることだが、日本の研究室とはまったく生活のリズムが違っていた。生活としては、皆、毎朝9時頃に出勤し、HIM でもっとも選定に時間がかかったというコーヒーマシンでエスプレッソを入れるのが、一日の始まりの常だった。一方、夕方6時には研究室はほとんど空っぽになる。金曜日に至っては、午後3時には誰もいなくなった。

彼らの仕事ぶりにも驚かされるが多かった。特に感銘を受けたのが、研究者と技術者との協力関係だった。日本では、研究者がすべてやらなければいけないという場面が多い。このことは、たしかに不意のトラブルへの対応や現象の深い理解につながることも多いものの、効率的でない部分が多いのも確かである。ドイツでは、マイスター的な発想のもと、特殊な装置を専属の技術者が全責任を負って維持・管理し、研究を支えていた。装置側のプロフェッショナルとしてともに研

究を推進していく彼らが、ドイツの研究を担う片輪であることは疑問の余地がない。

ところで、マインツでの滞在には大学の外来寮を利用することが出来たが、途中、寮に空室がなく、3週間ほどマインツ旧市街に住むことになった。駅から歩いて15分ほどのところにある下宿先は、100年以上前のアパートメントであり、まるで映画に出てくるかのような歴史を感じさせる家だった。家主は Fee Fleck という老齢のポーランド出身の女性画家で、第二次世界大戦のホロコーストの生き残りである。廊下は戦争を描いた巨大な絵で埋め尽くされており、一歩家に入った瞬間息をのんだ。ある意味でドイツ的な得難い体験だったと思う。

3. スイス ポール・シェラー研究所

2018年に入ってから、筆者はドイツとの国境に近いスイス フィリゲンにあるポール・シェラー研究所 (PSI) に移った。PSI はスイス人物理学者ポール・シェラーの功績を記念して1988年に設立されたスイス最大の自然科学および工学を対象にした多学問領域研究センターである。受け入れ先である R. Eichler 博士は超重元素研究で着実な成果をあげており、我々のグループとも国際共同研究をおこなう関係にある。本滞在では、実験が主体だったマインツとは異なり、表面電離イオン源内における原子の挙動シミュレーションの開発を目的とした。

HIM では学生部屋に間借りしたが、今度は Eichler 博士の居室で仕事をするようになった。凶らずもこれは非常にいい勉強になった。マインツでは、学生に近い視点から研究室をみることができたが、PSI では、一転研究室のマネジメント側から研究室を見渡すことができた。生活のサイクルはドイツと概ね変わらない。朝は早めに出てきてコーヒーを淹れ、雑談とディスカッションをしてから仕事に入る。筆者は、シミュレーション開発を行う傍ら、博士課程の学生の実験指導をすることになった。これは週に1度程度、PSI からバスと電車を乗り継いで2時間弱ほどかかるベルン大学に行き、113番元素ニホニウム実験を目指した真空クロマトグラフ装置の開発を行うというものだった。PSI でも、日本と同様に RI 使用のため

の手続きが煩雑化しているため、わざわざ大学で実験を行うことになってしまっているのだという。

このベルン大学は、在任時にアインシュタインが相対性理論を発見したことで知られている。スイスの首都であるベルンは、世界文化遺産に登録されているほどの歴史ある美しい街であり、休日の散策は大変楽しいものだった。他方、PSIのあるフィリゲンの最寄り町であるブルックは、古代ローマ帝国時代に防衛の要所となった地である。こぢんまりとした町ながら、近郊にはハプスブルグ家のルーツがあったり、町のあちこちで17世紀以前の建物が今も利用されていたりと、こちらも随所に歴史を感じさせる。街を散策しているとドイツとの違いに気付かされた。ドイツは第二次世界大戦時に爆撃で破壊されたところが多く、実はそれほど古い建物が残っていない。一方、スイスの都市はドイツのような空襲をあまり受けなかったため、数百年前の建築物が当時のまま、日

常に溶け込んでいる。

冬のスイスは -15°C を切ることもあるなど大変寒い思いをしたが、食事も美味しくとても過ごしやすく、充実した生活を送ることができた。

4. おわりに

今回、計10か月の長期間であるにも関わらず、快く送り出してくれた研究グループのメンバーに感謝いたします。先端基礎研究センターの事務方の皆さんのおかげでスムーズに長期滞在を終えることができました。ありがとうございました。また、受け入れ先であるHIM Ch. E. Düllmann教授とグループ員、そしてPSI R. Eichler博士夫妻と関係者の皆さんにも深く感謝します。彼らのおかげで、2017年度がとりわけ思い出深いものとなりました。最後になりますが、10か月間の単身赴任中、日本で家族を守ってくれた妻に心から感謝します。



写真1. ヘルムホルツ研究所マインツ 超重元素グループの学生らとともに



写真2. 水墨画のようなポール・シェラー研究所。研究所を東西に分けるアーレ川にかかるPSIアーレ橋より撮影

会議報告

第 19 回「環境放射能」研究会

吉田 剛 (高エネルギー加速器研究機構)

第 19 回「環境放射能」研究会が、平成 28 年 3 月 13 日から 15 日までの 3 日間、茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構において開催された (主催：高エネルギー加速器研究機構放射線科学センター、日本放射化学会 α 放射体・環境放射能分科会、共催：日本原子力学会保健物理・環境科学部会、日本放射線影響学会、日本放射線安全管理学会)。

本研究会は JCO 臨界事故を契機として平成 12 年にスタートし、自然環境放射能、放射線・原子力施設環境放射能を中心とする研究発表と情報交換を目的に、毎年 2 月末から 3 月の時期に開催されてきた。平成 23 年 3 月の東京電力福島第一原子力発電所事故 (福島原発事故) の後、平成 24 年 3 月 (第 13 回) 以降は、同事故に関連する環境放射能・放射線測定等に関わる研究発表が多数行われるようになり、同分野に関連する多くの研究者・技術者が集まる研究会となっている。以上の状況を踏まえ、第 19 回研究会は、1) 自然環境放射能、2) 放射線・原子力施設環境放射能、3) 東京電力福島第一原子力発電所事故を討論主題として開催され、依頼講演 3 件、特別講演 1 件、一般口頭発表 28 件、ポスター発表 59 件、計 92 件の発表が行われた。研究会の参加者は約 188 名であった。ここ数年において、発表件数 80 件超、参加者 200 人程度で推移しており、原発事故後 7 年が経過したにもかかわらず活発な議論が行われていることが窺える。放射化学会会員の皆様にも、環境放射能研究分野全体の継続的な発展のため、幅広い研究成果を本研究会で発表いただけるよう是非ともご協力をお願いしたい。

研究会全体を通して印象深かったのは、地方自治体などに所属する、研究を本職とはされない方々による非常に質の高い研究報告が数多くエントリーされていた点である。福島原発事故以降、この傾向は年々顕著になっており、私自身、本研

究会は 2 回目の参加であるが、前回にも増してさらに活発な議論が展開されているように感じた。

前述の通り、本研究会では依頼講演として 3 人の先生に講演いただいた。1 件目は、「森林・河川水系における放射性セシウムの動態—福島長期間環境動態研究 5 年間の成果と課題—」という演題で、原子力機構の飯島和毅先生に講演いただいた。森林、水系における放射性 Cs の動態を追いつけるというスケールの大きな研究プロジェクトについての報告で、環境放射能への馴染みが浅い私にも大変興味深い内容であった。2 件目は、「赤城大沼を中心とした水圏生態系における放射性セシウムの動態」という演題で、群馬県水産試験場の鈴木完真先生に講演いただいた。赤城大沼の放射性 Cs 滞留時間が特異的に長いことを突き止めた、7 年間にもおよぶ継続調査の実りある研究成果を発表いただいた。そして、3 件目は、「素粒子ミュオンを用いた新しい元素分析法の開発」という演題で、大阪大学大学院理学研究科の二宮和彦先生に講演いただいた。RCNP MuSIC の本格稼働により、J-PARC MUSE とあわせて、日本は世界トップレベルのミュオン実験施設を 2 つも所有する稀有な国となった。私もつい最近まで、二宮先生の下でミュオン原子の研究を行っていた経緯もあり、今回、このような場でミュオンの研究が周知され、とてもうれしく思う。

特別講演は、愛知医科大学の小島貞男先生に、「環境中に存在する放射性核種の放射化学分離分析」という演題で講演いただいた。冷戦時の環境放射能研究において、放射化学的分離は主役であったこと、その後 Ge 半導体検出器による γ 線スペクトロメトリーが主流になっても、放射化学分離は欠くことができない分析法であり続けたこと。放射化学の黎明期から直近の福島事故までの変遷を先生自らの体験を交えつつ説明され、私も大変興味深く拝聴させていただいた。

研究会の最後には、表彰式が執り行われ、以下の4講演に研究会奨励賞が授与された。「赤城大沼におけるイワナ¹³⁷Cs濃度の推移」(群馬県水産試験場・渡辺峻)、「スギ材部における放射性Cs濃度の推移」(福島県林業研究センター・小川秀樹)、「福島第一原発事故被災サル硬組織中の放射能濃度」(東北大学理学部・金子拓)、「クローバー根共生微生物の生成物による粘土鉱物中セシウムの溶出について」(京都大学大学院工学研究科・木村建貴)。4講演とも、質の高い発表内容と共に、質疑での対応が優れていた点で、多くの世話人から高い評価を受けたものであり、今後も優れた研究発表をいただけることが期待される。

当研究会では、毎回、査読付 Proceedings 論文集を発行しており、今回も9-10月頃に出版の予定である。第14回(H25年)以降の研究会 Proceedings については、Web ページから PDF ファイルとしてご覧いただくことも可能である。閲覧を希望される方は、以下のHPをご覧ください。

<http://rcwww.kek.jp/enviconf/fukushima-summary.html>

当研究会世話人会では、福島原発事故後5年間に当研究会で発表された報告内容を中心に、同事故に関わる環境放射能研究の現状と課題を分野ごとに取りまとめた冊子を編纂した。上記ページから、全内容のダウンロードが可能となっている。

東京電力福島第一原子力発電所事故の5年間における環境放射能研究のとりまとめ―「環境放射能」研究会における発表を中心に―

1. はじめに
2. 「環境放射能」研究会における東京電力福島第一原子力発電所事故関連研究報告
3. 「場 (ハード)」の観察結果と今後の課題：大気、森林地、土壌、陸水域、海洋、分析法
4. 「生物 (ソフト)」の観察結果と今後の課題：家畜、農作物、魚介類、野生植物
5. 「環境放射能」研究と人の関わり

冊子体での配布も行っており、冊子の希望や有用な配布先等、「環境放射能」研究会事務局 envconf@ml.post.kek.jp にご一報いただきたい。



研究会2日目(お昼休み)に撮影した研究会参加者の集合写真

会議報告

「第12回核融合エネルギー連合講演会」 開催報告

第12回核融合エネルギー連合講演会事務局

核融合エネルギー連合講演会は、究極のエネルギー源の実現をめざす核融合エネルギー研究の進捗状況に鑑み、多くの関連専門分野の総合的学術講演会を開催するという目的で、一般社団法人プラズマ・核融合学会と一般社団法人日本原子力学会が主催団体となり、2年に1度、交互に主担当を務めることで開催を続けている。今回はその12回目で、一般社団法人プラズマ・核融合学会が担当した。2018年6月28日(木)・29日(金)の両日、滋賀県の「ピアザ淡海(滋賀県立県民交流センター)」において開催した。副題として、「核融合炉のロードマップ:今、実用化に向けて!」を掲げ、大学等での基礎研究から大型プロジェクト研究、産業界での技術開発、建設が進むITER、さらに原型炉に向けた技術検討等さまざまな規模や時間スケールの研究や開発が進んでいる現状を、ロードマップという整理の仕方で見渡し、目標と課題を検討し、この分野の今後を考える会合になることを目指した。

会場となったピアザ淡海は、琵琶湖湖畔に建ち、講演の合間、企業展示会場等から湖が一望できるロケーションであった。参加者は、総数373名(正会員253名、学生会員82名、その他38名)、企業展示13社、ポスター発表259件(ポストデッドライン2件含む)、また懇親会参加者191名であった。

基調講演は、ITERプロジェクトの進展と今後の展開(多田栄介:ITER機構)、原型炉概念設計の進捗と展望(坂本宣照:QST)、LHD重水素実験開始に伴う高エネルギー粒子閉じ込め研究の新展開(磯部光孝:NIFS)、JT-60SA建設の現状とコミッシング計画(東島智:QST)、高速

点火による核融合プラズマ加熱の実証と高エネルギー磁化プラズマ科学の進展(藤岡慎介:阪大)、の5講演が行われた。活況だったポスターセッションを挟んで、招待講演は、日本の核融合研究開発政策と今後の課題(松浦重和:文部科学省研究開発戦略官)、地球温暖化対応・エネルギー戦略の在り方と核融合エネルギーの役割(秋元圭吾:RITE)の2講演で、それぞれ核融合開発の意義が最近急速に変わりつつあることを示唆した。シンポジウムは初日にシミュレーションと加熱・電流駆動、2日目にブランケット、ダイバータ、ヘリカル・レーザーの将来計画、の計5件、それぞれに最新の成果と将来に向けた課題が報告された。またパネルディスカッションでは、エネルギーシステムとアウトリーチの問題、つまり外から見たときの核融合と、研究開発側からの対応について様々な切り口での報告があり、議論が交わされた。核融合研究開発は、最先端の学術研究であると同時にエネルギー開発であり、社会の要請に的確にこたえることが必要であることが改めて指摘された。

今回は特に前日(27日)に、中高生をはじめ、一般市民の方々に、最新の核融合研究他を紹介するために、市民公開講演会を開催した。こちらでも100名余りの参加者があり、講演後の質問コーナーも、非常に活発なやり取りが行われた。

最後に、日本放射化学会様をはじめ21の学協会からご共催・ご協賛いただき、有意義な講演会を開催することが出来ましたこと、感謝いたします。

会議報告

Eleventh International Conference on Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry (MARC XI)

鈴木 達也 (長岡技術科学大学)

International Conference on Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry (MARC) は3年に1回、ハワイ島コナで毎回4月 (MARC IXは3月末) に開催されています。コナへは一時期なくなっていたJALの成田-コナ便も復活し、またハワイアン航空の羽田-コナ便もあり、アクセスも容易です。開催場所は、ケアウホウにあるシェラトンホテルです。余談ですが、かつては、カイルア・コナの中心地にあるキングカメハメハホテルで行われており、その場所に戻ることを望む声も多くあります。ケアウホウは町の中心から離れていて若干不便であるのもその理由です。なお、私は、今回オーバーブッキングを理由に会議開催2日前にシェラトンをキャンセルされてしまうと言うことがあり、カイルア・コナのダウンタウンでホテルを取り直すと言うアクシデントに見舞われました。朝、試しにカイルア・コナからケアウホウまで歩いてみたところ、2時間半近くかかりました。さて、本題に戻ります。今回のMARC XIは2018年4月8日～13日の間に開催されました。MARCは、会議名にありますように放射分析化学の方法とその応用と言うことで、環境放射能、放射線計測、質量分析、分離化学などの発表がありますが、実際には更に広範な分野の発表があります。例えば、核燃料サイクルや核種分離、同位体製造です。また、核化学に関する分離やターゲットについてのセッションもあります (この分野に関しては、かつては大変多くの発表がありました、今回は1セッション分だけになってしまいました)。もちろん福島事故に関連した放射生態学的研究などの発表も行われています。こここのところ増えている分野は、核鑑識 (Nuclear Forensics)、保障措置 (Safeguard) や核不拡散 (Non-proliferation) に関する分析に関係するもので、今回は特に発表件数が多く、ほ

ぼ毎日しかも時にはパラレルでセッションが開催されておりました。発表件数は、全部で456件、その内、口頭発表が301件、ポスター発表が155件 (何件かはポスターが貼られていないものもありましたが) と大変多く、口頭発表は4つの会場でパラレル発表が行われておりました。ただ、キャンセルもそこそこ有ったようで、私もある会場で講演を聴こうと思って行ったら、時間前なのに、聞きたかった講演が既に終わっており、チェアだったエクベルク先生にもう終わったのかと聞いたたら、キャンセルがあったので先に進めてしまった申し訳ないと謝られてしまいました。ビザが間に合わなかったあるいは取れなかったのかもしれないと思っております。参加者がどこの国から来ているのかはわかりませんが、ホームページによると35カ国以上となっております。今回特徴的だったと思っているのは、中国からの参加者が多かったことです。今までは (残念ながら前回は参加していませんが) あまり多くなかったと思っており、参加していた旧知の石先生に聞いたところ、今回が初めてだと仰られておりました。帰りの空港でも一緒だったので石先生と色々中国の研究事情等も話しをしましたが、研究費の潤沢度が全く日本の大学と比べ物になりませんね。今後、益々中国からの参加者は増えて行くのだろうなと思っております。

ポスターセッションで福島大学高貝先生の学生に私が質問しているところを高貝先生から送っていただきましたので図1に示します。ポスターセッションは火水木と3日間に分けて開催されましたが、興味のない分野の発表の時はセルフエクスカーション (オフィシャルなエクスカーションはありません) に出かけている人が多いのか、若干参加者が少なかった様に思いますが、参加者は熱心に議論をしておりました。

図2はFarewell Dinnerの様です。いつもはホテルの庭で行うのですが、この日は生憎の雨で、屋内で行いました。私は帰りのバスの関係で1時間ほどで会場を抜けてしまいましたが、盛り上がっていたようです。

以上、大変ざっぱくな感想文のような会議報告になってしまいましたが、本会議は内容的にも、放射化学会員の皆様には良くあっており、オアフ

島とは違ったハワイ島のゆったりとした雰囲気（実は、私はオアフ島には行ったことがないので本当のところはわかりませんが）もあり、お勧めの会議です。年度初めで、忙しい人も多いかとは思いますが、ぜひ3年後にコナでお会いできればと思っております。それでは、最後まで私の駄文に付きあっていただきましてありがとうございます。マハロ。

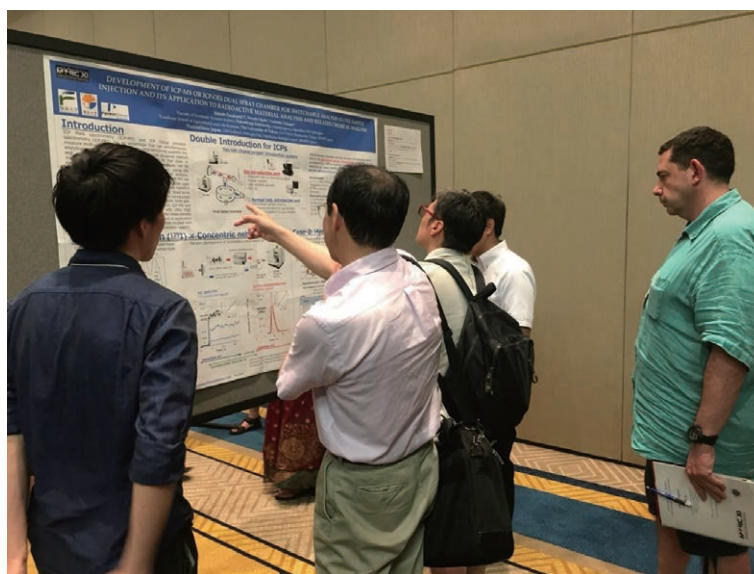


図1 ポスターセッションの写真（福島大学高貝先生の写真）



図2 Farewell Dinner（福島大学高貝先生による写真）

会議報告

RadChem2018 会議報告

島田 亜佐子（日本原子力研究開発機構）

Radchem2018 (18th Radiochemical Conference) は、チェコにおいて 55 年以上も定期的開催され続けている放射化学関連の基礎および応用研究に関する学会で、今回で 18 回目となる。1998 年（第 13 回）～ 2018 年（第 18 回）までの 6 回はチェコ工科大学の Jan John 教授が組織委員長を務め、チェコで 2 番目に大きな温泉地であるマリーアンスケラズーニャで 4 年ごとに開催された。学会参加者は 340 名ほどであり、チェコ以外にドイツとロシアからの参加者が多く、次いで中国、フランス、日本の順で参加者の半数を超えていた。毎回趣向を凝らした試みがあり（主催者ら曰く Innovation）、前回の 2014 年にはウェルネスナイトと称した開催地の温泉につかれるプランなどがあったが、今回はチェコ名産のビールパーティやウランガラスのビーカーセットの記念品などがあった。現在ではウランガラスを製造している国は少なく、稀有な記念品である。

この学会のプロシーディングスは、厳正な審査の上、90 報が Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry (JRNC) の特別号に掲載される。今年は JRNC が刊行 50 周年ということもあり、オープニングセレモニーの後、Zsolt Revay 博士により雑誌の紹介や近年急激に上がったインパクトファクターのこと、投稿されてくる論文に多い誤差の取扱いの誤りに対する注意喚起などが発表された。

学会では、核燃料サイクル、使用済燃料の取扱いにおける放射化学的な問題、アクチノイド化学、分離化学、分析化学、環境化学、放射線化学、核医学、アイソトープ製造に関する研究分野が各セッションに分かれて口頭ならびにポスター形式で発表された。環境化学関連の発表では、環境試料中の ^{236}U や ^{233}U などと ^{238}U の比や ^{129}I と ^{127}I の比、化学形態 (I^- , IO_3^- 、有機形 I) などを調査し、その起源や汚染経路の特定などについて考察する



著者の発表風景

発表があった。一方、発生元となる原子力施設などでは廃棄物中の放射性核種の分析法の開発や分析結果についての発表や、 ^{129}I の化学形態に留意してこれを1F汚染水から除去するための吸着剤の開発についての発表などがあった。使用済燃料の処理関連分野ではTODGAやDGA誘導体、窒素ドナー配位子などを用いた溶媒抽出に関する発表が多かったが、分析分野では抽出剤を樹脂に含浸させた抽出クロマトグラフィーを用いた分析法の開発に関する発表が多かった。分離のための分離と分析のための分離は同じではなく、用法や規模等は変わるが、原理原則は当然共通する部分が多い。全体的に、セッションとしての区切りはあ

るが、各分野間につながりがあり、一週間を通じて聴講していると放射化学の分野の全体像のようなものが感じられる。また、分析機器関連のニュースとしては、チェコで初めての加速器質量分析計の建設が進められているとのことであった。また、トリプル四重極質量分析計の性能向上は目を見張るものがあり、アバンダンス感度が10桁との報告もあった。各セッションの合間のコーヒープレイクには、かなり大きいケーキも提供され、昼食もかなり豪勢である。お好きな人は、お昼からチェコのビールもたしなめる。多くの情報で頭がいっぱい、おいしい料理でおなかもいっぱい、かなり満足できる学会であった。

時過ぎて

Physics and sake with Koh Sakamoto

Professor Michael Paul (Racah Institute of Physics, The Hebrew University of Jerusalem)

It is with personal memories of Professor Koh Sakamoto that I would like to start this letter and reminisce of two short and intense meetings I had with Koh. Short but unforgettable and unforgettable. The year was 2002 shortly after Koh had retired from active duties at Kanazawa University and left the baton to Professor Takashi Nakanishi. That year followed also a period of intense email correspondence between Koh, Takashi and myself where we discussed the preparation, later the analysis, the results and eventually the publication of a measurement of the ^{244}Pu content of a dredged seafloor sediment sample. The original hypothesis and concept of this experiment belonged to Koh who had suggested that ^{244}Pu , an isotope of Pu which is short-lived on Galactic time scale and likely extinct on Earth, may deposit by accretion of interstellar grains. I will come back to this measurement which has driven since a continuous flow of experiments and return to my meetings with Koh. The first was no less than a dinner in Kanazawa where I discovered the exquisiteness of traditional Japanese setting and sea delicacies. But the real discovery was the chemistry which started to bond us, catalyzed by sake continuously replenished and by its vapors. Chemistry and vapors which allowed us to cover physics, life and the universe in the ever closer friendship which had just been born. Our second meeting was the next day, after sobering up and while visiting the Kanazawa Kids' Science Center that Koh had created. I cannot help quoting here from an email of Koh's that I dig from a computer, a vintage one still in function: "P.S.: I got retired from Kanazawa University on April 1, 2000, and have been giving a lecture on a freshman chemistry once a week.



Also I am in charge of Director of "Kanazawa Kids' Science Center (Kanazawa Kodomo Kagaku Zaidan)", a foundation under a support of the City Government. This aims to encourage and attract school children in science study through extra-curricula science experiments." Koh's enthusiasm, pride and joy for this enterprise and at showing the experiments in the Center were simply contagious.

The scientific career of Professor Sakamoto had actually started some fifty years beforehand, at the time of the discovery that ^{244}Pu , the isotope I mentioned before, was present and live in the Early Solar system. Professor Kuroda, together with Koh Sakamoto who worked in Kuroda's lab after earning his PhD degree from Osaka University, were to become major players in the field then nicknamed xenology. The study of the isotope anomalies of xenon degassed from meteorites showed unequivocally a contribution from ^{244}Pu fission decay. This demonstrated that ^{244}Pu was still live (and decaying) when the solids first formed in the Solar system, later to become planets, asteroids and meteorites. The study of isotopic anomalies of different elements

e.g. ^{26}Al in aluminum, ^{129}I in iodine (to which Koh also contributed), have developed in fact into a vast field of research since the 1970's till today. It shows that the Early-Solar system contained a family of radionuclides with different half-lives, adding one by one clues on the history of our natural environment. It was therefore along this intellectual path that Koh suggested to look for ^{244}Pu in deep-sea sediments, used here as a natural repository of fresh interstellar material, possibly similar to that which coalesced into the Solar system. Koh had by that time long returned to Japan where after several years in Tokyo, he established his research group at Kanazawa University, followed later by Takashi. To come back to our experiment, the findings were, as it happens, negative meaning that, within our hypothesis, ^{244}Pu is presently rare in our interstellar vicinity. This rarity was confirmed, I must say to our absolute delight, by a series of new measurements performed by Anton Wallner and his group at the Australian National University. I am sure it was to Koh's absolute delight as well that his "academic grandson" Dr. Norikazu Kinoshita, a former student of Takashi's, played a key role in these recent experiments by locating new and interesting deep-sea samples and chemically processing them for ^{244}Pu analysis. ^{244}Pu , identified by Koh in meteorites as a component of the Early-Solar system, was thus shown by Nori, his grandson, to be "abnormally" rare in present and local interstellar matter. To leave Koh's academic family aside for a moment, the finding is important since it is interpreted as an evidence for a major role of rare events such as neutron star mergers in the production of ^{244}Pu and r-process elements, a topic of intense current interest.

Another realm of Professor Sakamoto's scientific career spans a wide area of geophysics, namely the

in-situ production of radionuclides and detection of trace elements in rocks. Strikingly, a paper Sakamoto published in 1975 while in Tokyo was the first to show a positive result for the detection of ^{26}Al in rocks, produced by muon-induced cosmogenic reactions. ^{26}Al , a nuclide mentioned before in relation to the Early Solar system has a half-life of 740,000 years and is extremely difficult to detect by gamma decay counting at natural concentrations. This measurement came three years before the emergence of accelerator mass spectrometry (AMS) which became a far more sensitive detection technique for rare radionuclides using atom counting rather than decay counting. Among these, ^{26}Al detection and its use for determination of erosion rates and rock morphology which Sakamoto and co-workers had the insight to initiate, have become routine. Striking above all is the quantitative determination of ^{26}Al content of quartz made in the 1975 foresight paper in perfect agreement with the more precise later AMS values. Related to these geophysical topics, Professor Ohtsuki and Professor Mitsugashira from Koh's group who had later moved to Tohoku University were active in photonuclear and neutron-induced reactions studies, and became major players in our measurement of the ^{146}Sm half-life. The continued key roles of Takashi Nakanishi and then his student, Norikazu Kinoshita in this experiment highlight the strong connectivity in the large Koh's academic family. ^{146}Sm , another Early-Solar component, and its half-life have fascinating implications on our understanding of the Solar system early history.

Professor Sakamoto lived physics and is sorely missed. As dear as physics, sake and its vapors have and for ever will have for me the taste of my first encounter with Koh.

情報プラザ (国際国内会議)

国内会議

**2018 日本放射化学会年会・第62回放射化学
討論会**

日時：2018年9月18日～20日
場所：京都大学 吉田キャンパス

2018 年度日本地球化学会第65回年会

日時：2018年9月11日～13日
場所：琉球大学 千原キャンパス

2019 年日本化学会第99春季年会

日時：2019年3月16日～19日
場所：茨城大学 水戸キャンパス

2019 年日本原子力学会 春の年会

日時：2019年3月20日～22日
場所：茨城大学 水戸キャンパス

第20回「環境放射能」研究会

日時：2019年3月12日～14日
場所：高エネルギー加速器研究機構

国際会議

**11th International Symposium on Target
Alpha Therapy (TAT11)**

日時：1-5, April, 2019
場所：Ottawa, Ontario, Canada

**6th International Conference on the
Chemistry and Physics of the Transactinide
Elements (TAN 19)**

日時：25-30, August, 2019
場所：Wilhelmshaven, Germany

**2nd International Conference on
Radioanalytical and Nuclear Chemistry
(RANC 2019)**

日時：5-10, May, 2019
場所：Budapest, Hungary

**ENVIRA 2019 - 5th International Conference
on Environmental Radioactivity**

日時：8-13, September, 2019
場所：Prague Czech

**15th International Conference on Modern
Trends in Activation Analysis (MTAA-15)**

日時：17-22, November, 2019
場所：Mumbai, India

**10th International Conference on Nuclear
and Radiochemistry (NRC-10)**

日時：24-28, August, 2020
場所：Manchester UK

本だな

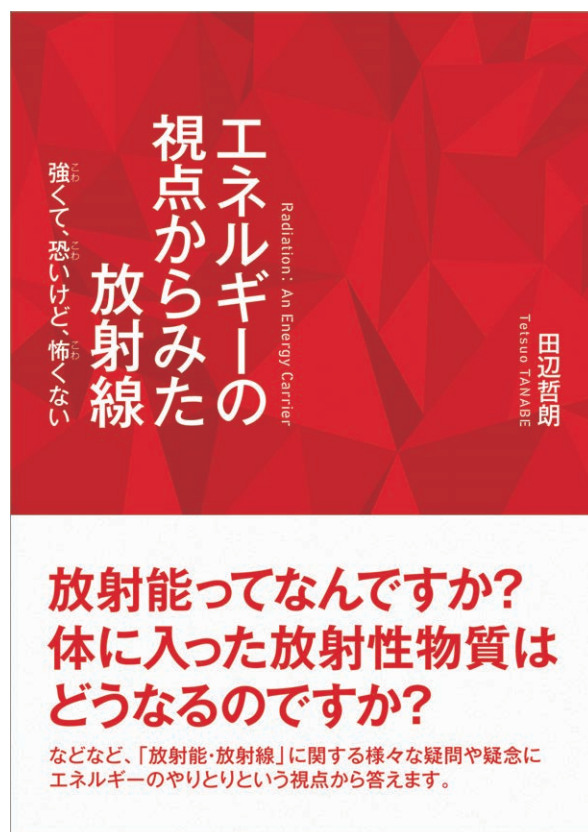
エネルギーの視点からみた放射線

— 強くて、怖いけど、怖くない — 田辺 哲朗 著

鈴木 達也 (長岡技術科学大学)

最初にこの本の題名を聞いたとき、エネルギー産業の観点もしくは原子力エネルギー観点から見た放射線について記述しているのかなと思っておりましたが、実際に、本を手にとって中身を見てみたところ、私の勘違いだと言うことが分かりました。英語の副題が「Radiation: An Energy Carrier」と成っております、この副題が内容を端的に示しております。つまり、放射線をエネルギーの媒体として捉えて、種々の現象を理解しようとするものです。もちろん、その中には原子力のことも記載されています。そのような観点から本書では、「放射線」よりも「エネルギー量子線」という言葉を使って説明が成されています。もちろん、第1章で説明してからですが。書かれている内容は非常に広く、放射線とは何であるのか、放射線源にはどんな種類があるのか、放射線と物質の相互作用はどのようなもので、生物や人体への影響はどうか、放射線はどうやって測るのか、放射線の利用は？など、非常に幅広く、宇宙、自然界、原子炉や福島問題まで含めてわかりやすく説明していただいております。本書は、放射線や放射線の作用などを理解するのは最適なものの一つではないかと思えます。一般の方にも読んでいただきたいと思いますが、本書を理解するのは高校理系卒業程度あるいは大学低学年程度の知識が必要でしょう。放射化学会員(学生会員も含めて)には易しすぎると感じるかもしれません。ただ、エネルギーの輸送やエネルギー付与の観点から放射線を見つめなおし、放射線の発生や影響について考え直してみることは、放射線の理解を深めるためにも大変良いことだと思います。また、本書の付録に「放射線についてのQ & A」が付いており、この説明も大変分かりやすいものです。一般の方々に説明するのに本書を読んでおくに役に立つのではとも思えます。私も、この書評を書いた

めに、さらっと読んでいただけなので、これから熟読したいと思っているところです。副題の「強くて、怖いけど、怖くない」については、ぜひ本書を読んで意味するところを理解していただければと思います。



九州大学出版会 (2018年1月25日初版) 141ページ
ISBN978-4-7985-0221-2 本体 2,700円

.....

学位論文要録

.....

混合原子価鉄三核フッ素置換安息香酸錯体の原子価揺動の⁵⁷Feメスバウアー分光法による研究
(Study of valence fluctuation of mixed-valence trinuclear iron fluorine-substituted benzoate complexes by ⁵⁷Fe Mössbauer spectroscopy)

小木曾 了 (大同大学 非常勤講師)
学位授与：博士(工学) 大同大学大学院
論文博士

主査：酒井陽一 平成30年3月28日

混合原子価鉄三核フッ素置換安息香酸錯体は、原子価(酸化数)の異なる3つの鉄イオンをもつ錯体化合物である。混合原子価錯体においては、3つの鉄イオン間での電子移動のために原子価が固定されないということが起こり、これを原子価揺動という。混合原子価錯体における原子価揺動現象は化学的に興味深いものであるが、固体中の電子移動に関わる種々の工業的応用にもつながる可能性を持つ。このような背景のもと、⁵⁷Feメスバウアー分光法、X線回折法などの手法により、いくつかの混合原子価錯体における原子価揺動に関する新しい現象を明らかにした。

本論文は全7章からなる

第1章においては、研究の背景と目的について述べている。混合原子価化合物および原子価揺動についての概要が説明され、また本論文の研究対象物質が属する混合原子価鉄三核カルボン酸錯体における原子価揺動の先行研究が紹介されている。その上で、未解決の課題は何か、何故この研究対象物質を選択したか、何を明らかにしたいかななどの本論文の研究目的が述べられている。

第2章では、使用された測定方法、すなわち、⁵⁷Feメスバウアー分光法、X線回折法などの原



理、実験法が述べられている。また、本論文の研究で使用した測定機器についての説明がなされている。

第3章では、結晶溶媒としてジクロロメタンをもつペンタフルオロ安息香酸を配位子とする三核鉄錯体の2つの結晶形(六方晶系と斜方晶系)について説明している。研究成果として、2つの結晶形を化学合成的に作り分ける手法を確立した。2つの結晶形は、化学組成が同じ化合物であるにもかかわらず、メスバウアースペクトルにおいて顕著な原子価揺動の違いを示した。両錯体における原子価揺動挙動の違いの要因は、結晶中での分子構造と結晶構造の違いに帰せられた。単結晶X線構造解析により、この2つの結晶形の構造を明らかにした。六方晶系錯体では、3つの鉄イオンは正三角形で位置形成している。一方、斜方晶系錯体では、3つの鉄イオン間の位置は非等価で、二等辺三角形で位置形成している。3つの鉄イオンが正三角形で等価な場合は、電子移動するのに最適な条件となり、その結果、室温において原子価揺動現象を起こす。一方、斜方晶系では、3つの鉄イオンが二等辺三角形を形成しているため電子移動が起きず、原子価揺動が高温でも起こらないことを明らかにした。

第4章では、配位子の置換基効果について述べている。配位子であるペンタフルオロ安息香酸のF

原子を1つH原子に置き換えた2種のテトラフルオロ安息香酸で、2種の混合原子価鉄三核テトラフルオロ安息香酸錯体を合成した。フッ素置換安息香酸配位子からの電子吸引効果は、錯体の ^{57}Fe メスバウアー分光挙動に反映されなかった。

第5章においては、結晶溶媒分子の抜けた空のチャンネル構造について説明がなされている。減圧加熱で六方晶系混合原子価鉄三核ペンタフルオロ安息香酸錯体から結晶溶媒を取り除く実験法を確立し、さらに、その結晶溶媒のない錯体粉末を種々の有機蒸気にさらし、再び有機分子を結晶溶媒として取り込ませることに成功した。得られた試料の ^{57}Fe メスバウアー測定、粉末X線回折測定により、原子価揺動現象に着目しながら、結晶溶媒分子が抜けた空のチャンネル構造について知見を得ることができた。結晶溶媒のない錯体が、気体状の有機分子を取り入れることができ、それを ^{57}Fe メスバウアー分光で検出できることは、有毒ガスセンサーとしての工学的応用の可能性を拓く。

第6章では、3つの鉄イオンの1つをクロムイオンに置き換えた混合原子価異種金属ペンタフルオロ安息香酸錯体について述べている。研究成果として、3つの金属イオンの中で2つの鉄イオンとの間でのみ電子の移動が起き、クロムイオンはその電子移動に関わらないことを、 ^{57}Fe メスバウアー分光法を用いて明瞭に示すことができた。

最後に、第7章では、本研究で得られた実験結果と成果の全体を概観し、総括した。

混合原子価三核鉄フッ素置換安息香酸錯体を研究対象として、 ^{57}Fe メスバウアー分光、X線回折法により興味深い研究成果をいくつか得た。この成果は、原子価揺動現象が結晶溶媒に強く影響されることを示唆している。また、結晶構造の違いによっても原子価揺動現象に大きな違いとなつてあらわれる。そして、工学的な応用として、原子価揺動現象を ^{57}Fe メスバウアー分光で観測することで、錯体の結晶に取り込んだ溶媒分子

の有無を区別できる可能性も見出した。

代表的な発表論文

1. "Mössbauer spectroscopic study valence-detraping and trapping of mixed-valence trinuclear iron (III, III, II) fluorine-substituted benzoate complexes"
Yoichi Sakai, Satoru Onaka, Masashi Takahashi, Ryo Ogiso, Tsutomu Takayama, Tadahiro Nakamoto
Hyperfine Interactions, Vol.205, **2012**, pp.1-5.
2. "Observation of iron-valence detraping in mixed-valence trinuclear heterometal-pentafluorobenzoate cluster complex $\text{Cr}^{3+}\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{2+}\text{O}(\text{C}_6\text{F}_5\text{COO})_6(\text{C}_5\text{H}_5\text{N})_3 \cdot 0.5\text{C}_5\text{H}_5\text{N} \cdot \text{CH}_2\text{Cl}_2$ by ^{57}Fe -Mössbauer Spectroscopy"
Ryo Ogiso, Yoichi Sakai, Satoru Onaka, Tadahiro Nakamoto, Tsutomu Takayama, Masashi Takahashi
Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, Vol.13, **2013**, pp. N1-N3.
3. "Synthesis, structure and valence-trapping vs. detraping for new trinuclear iron pentafluorobenzoate complexes: possible recognition of organic molecules by ^{57}Fe Mössbauer spectroscopy"
Satoru Onaka, Yoichi Sakai, Tomoji Ozeki, Tadahiro Nakamoto, Yusuke Kobayashi, Masashi Takahashi, Ryo Ogiso, Tsutomu Takayama, Michito Shiotsuka
Dalton Transactions, Vol.43, **2014**, pp. 6711-6719.
4. "Mixed-valence states of orthorhombic $[\text{Fe}_3\text{O}(\text{C}_6\text{F}_5\text{COO})_6(\text{C}_5\text{H}_5\text{N})_3] \cdot \text{CH}_2\text{Cl}_2$ characterized by X-ray crystallography and ^{57}Fe Mössbauer spectroscopy: comparison with a hexagonal polymorph"
Yoichi Sakai, Ryo Ogiso, Takeshi Kawasaki, Takafumi Kitazawa, Tadahiro Nakamoto, Tsutomu Takayama, Masashi Takahashi
Bulletin of the Chemical Society of Japan, Vol.90, **2017**, pp. 237-243.

学会だより

1. 日本放射化学会第82回理事会 [2017 学会 年度第3回理事会] 議事要録抜粋

日時：2017年12月2日(土) 13:00-16:30

場所：東大農学部2号館1階 講義準備室

出席者：[会長]中西、[副会長]篠原、[理事]
大槻、酒井、羽場、間柄、大矢、北辻、
塚田、渡辺、[監事]末木、工藤

欠席者：[理事]長尾、坂口

オブザーバー：JAEA 渡邊 (APSORC2013 実行
委員)

報告

1. 事務局報告として、前回議事録の確認、会員の
動向・会費納入状況、会計の報告ならびにメー
ル回議の報告がなされた。賛助会員1社と連絡
がつかなくなっており、同社に知人がいる理事
が直接確認することとした。
2. 放射化学誌について、J-Stage への掲載準備が
整ったこと、今後、過去分も pdf 化して掲載予
定であることが報告された。
3. APSORC 基金の設立及び管理について、
APSORC2013 実行委員会から報告があり、日
本放射化学会からの補助金の返金分を学会会
計に戻すほか、200万円を APSORC 基金とす
ることが説明された。基金の利用について、参
加学生の支援や外国開催時の支援金などにも
使えることを確認し、覚書を取り交わすことにな
った。
4. APSORC-IC 規約改定について報告があり、本
会会長及び担当理事の2名を APSORC-IC へ参
加させることとした。

審議

1. 若手の会からの提案について、理事会として若
手の会を支援することが承認された。若手の会
の主体的な活動に期待し、今後、支援について

の具体的な要望を提案してもらったこととした。

2. JNRS メールニュース配信班の組織改編につい
て提案があり、新年度から久保謙哉氏をリー
ダーとする新体制とすることが承認され、新体
制発足後に組織の委員会化について議論する
こととした。また、インターネット広報委員長
を新年度から高宮幸一氏とする提案が承認さ
れた。
3. 2018 学会年度学会賞のスケジュールについて
討議し、選考委員の委嘱後に理事が交代となる
ことは不都合であるため、選考スケジュールを
再検討することとした。今回の木村賞候補者の
理事会推薦は見送ることとした。
4. 会員管理を行う上での不明確な点について協
議し、以下の点を確認した。学生会員の資格に
は、大学及び大学院に在学する者の他、研究生
も含める。休学中の学生会員の休会を制度化す
る。学生会員の入会申し込み時に、指導教員の
情報を得る。学生会員の資格について、指導教
員の確認を得る。永年会員、名誉会員、外国人
特別会員は、正会員に含む。入会金に関する規
定を会則に明記する。会費未納者は年限を区
切って除名とし、その手続きを明確化する。

以上

2. 日本放射化学会第83回理事会 [2017 学会 年度第4回理事会] 議事要録抜粋

日時：2018年3月3日(土) 13:00-15:30

場所：東大農学部2号館1階化学2講義室

出席者：[会長]中西、[副会長]篠原、[理事]
酒井、坂口、羽場、間柄、大矢、北辻、
塚田、[監事]末木、工藤

欠席者：[理事]大槻、長尾、渡辺

オブザーバー：田上、高橋、石岡、緒方、木下、
佐藤、高宮、別所、箕輪

* 委任状提出：なし

報告

1. 事務局報告として、前回議事録の確認、会員の動向・会費納入状況、会計の報告ならびにメール回議の報告がなされた。若手の会への補助は、「研究会等補助」から支出することを確認した。
2. JNRS 誌の投稿数及び掲載数の状況について報告があり、英文校閲キャンペーンを学生とポストクに対象を絞ったうえで当面継続することとした。受賞者への執筆の働きかけを再度強化することとした。また、放射化学誌編集委員の交代について、次期委員及び新編集委員長の選任は、メール審議とすることとした。
3. 第 62 回年会・討論会の準備状況について、実行委員会から準備状況が報告された。
4. 2018 学会年度学会賞応募状況について、公募スケジュールの確認と応募状況が報告された。
5. 篠原次期会長から来年度役員の役割分担が提案された。他学会との協力強化のため、行事・渉外担当理事を増やす方針が示された。

審議

1. 若手の会の組織化の状況が報告された。学会としての公認方法を議論し、若手の会の意見を聴取した上で設置規則を定めることとした。また、若手の会から提案された活動計画を審議した。他学会への学生の派遣については、指導教員の関与なく発表することは難しいとの意見が出され、あり方を継続して検討することとした。
2. 長期未納者への対応について、今年度末となる 3 月 31 日まで該当者への連絡を試み、納入の意思が確認できない場合は、同日をもって除名とする案が承認された。
3. 賛助会員 1 団体から出された退会希望への対応を協議し、慰留することとした。退会理由を確認の上、先方の役員等に働きかけることとした。
4. 第 63 回年会・討論会の開催地及び創設 20 周年記念事業について議論し、2019 年及び 2021 年の開催地を東大、原子力機構等、関東エリアで検討することとした。開催候補地の理事は持ち帰って検討することとした。また、「年会・討論会」のダブルネームになっていることについて、解消できないかとの意見があった。名称変更について担当理事が検討を進め

ることとした。

以上

3. 日本放射化学会第 84 回理事会 [2018 学会年度第 1 回理事会] は、2018 年 6 月 16 日 (土) に開催されましたが、議事要録未承認のため、次号にて報告します。

4. 会員動向 (平成 30 年 2 月～平成 30 年 6 月)

新規入会 (学生会員)

氏名	所属
齊藤 一輝	新潟大学理学部化学科核・放射化学研究室
鈴木 颯人	日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター重元素核化学研究グループ
高橋 佳暉	新潟大学理学部化学科核・放射化学研究室
廣瀬 耀	新潟大学理学部化学科核・放射化学研究室

所属変更 (正会員)

氏名	所属
青柳 登	日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター界面反応場化学研究グループ
石井 康雄	国立研究開発法人量子科学研究開発機構六ヶ所核融合研究所管理部保安管理課
豊嶋 厚史	日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター
南部 明弘	狭山ヶ丘高等学校・狭山ヶ丘高校付属中学校
初川 雄一	量子科学技術研究開発機構
福島 美智子	石巻専修大学工学部食環境学科
古田 悦子	首都大学東京理学専攻
本多 真紀	VERA (Vienna Environmental Research Accelerator) facility, Isotope Research and Nuclear Physics, University of Vienna

間柄 正明	日本原子力研究開発機構福島環境安全センター
松江 秀明	日本原子力研究開発機構原子力科学研究部門原子力科学研究所研究炉加速器技術部計画調整課
山村 朝雄	京都大学複合原子科学研究所原子力基礎工学研究部門量子リサイクル工学研究分野
渡辺 茂樹	量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所放射線生物応用研究部プロジェクト「RI医療応用研究」

所属変更 (学生会員)

氏名	所属
小林 磐基	新潟大学大学院自然科学研究科数理物質科学専攻核化学研究室
床井 健運	茨城大学院理工学研究科博士前期課程量子線科学専攻ビームライン科学コース
庭瀬 暁隆	九州大学理学府物理学専攻粒子物理学講座実験核物理研究室

退会 (正会員)

氏名	氏名
河野 公栄	菊池 貴宏
小林 智之	櫻井 久雄
卷出 義紘	松岡 弘充

退会 (学生会員)

氏名	氏名
稲垣 誠	近藤 成美
佐藤 大輔	竹中 聡汰
田中 康介	鳴瀬 佑樹
西山 純平	藤井 健悟
藤田 将史	村野井 友
山守 航平	

逝去退会 (名誉会員)

氏名
坂本 浩

除名 (正会員)

氏名	氏名
今井 佐金吾	大橋 康典
中西 章夫	安池 賀英子

退会 (賛助会員)

社名・団体名
株式会社ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション

○ 2016 学会年度 (2016 年 9 月 1 日 - 2017 年 3 月 31 日) 決算

収入の部

単位 (円)

項目	予算	決算	差額 (収入-予算)	備考
個人会費	1,159,500	1,153,000	-6,500	2016 年度以前、2017 年度、 入会金含む
賛助会費	1,150,000	850,000	-300,000	24 団体中 17 団体
雑収入	0	2	2	利息
前年度繰越金	5,044,863	5,044,863	0	
収入合計	7,354,363	7,047,865	-306,498	

支出の部

単位 (円)

項目	予算	決算	差額 (収入-予算)	備考
2015 討論会要旨集補助	200,000	0	200,000	
出版事業費	780,000	640,871	139,129	
事務費	5,000	0	5,000	事務通信費等
雑誌校正・印刷費	700,000	613,051	86,949	放射化学 34 号, JNRS16
送料、封入作業費等	50,000	27,820	22,180	送料、封入作業等
J-Stage 用 pdf 化費	25,000	0	25,000	
会議費	330,000	149,590	180,410	旅費
理事会	300,000	149,590	150,410	12,3 月理事会
委員会等	30,000	0	30,000	
研究会等補助	150,000	50,000	100,000	環境放射能研究会
事務局経費	260,000	226,674	33,326	
事務費	30,000	7,912	22,088	封筒・ファイル、 印刷等
外部委託費用 (会費、 会員管理)	225,000	217,890	7,110	9-12 月業務費用、 1-3 月概算払
通信費	5,000	872	4,128	資料送付
ネットワーク管理運営 費	24,500	24,439	61	ネット関係
プロバイダ費用	24,500	24,439	61	
学会賞	130,000	127,440	2,560	年会
楯	130,000	127,440	2,560	2016 年度分振込遅
共催金	5,000	0	5,000	
支出小計	1,879,500	1,219,014	660,486	
予備費 (繰り越し)	5,474,863	5,828,851	-353,988	
支出合計	7,354,363	7,047,865	306,498	

○次年度繰越金 (内訳)	5,828,851 円	○基金等 (内訳)	3,738,532 円
三井住友銀行	502,033 円	基金 (黒田基金 40 万円を含む)	2,810,805 円
ゆうちょ銀行 (振替口座)	5,326,003 円	記念事業分	627,378 円
現金	815 円	基金 (斎藤基金)	300,349 円
合計	9,567,383 円		

○ 2018 学会年度 (2018 年 4 月 1 日 - 2019 年 3 月 31 日) 予算

収入の部

単位 (円)

項目	2017 学会年度	2018 学会年度	差額	備考
個人会費	2,319,000	2,228,000	-91,000	
賛助会費	1,150,000	1,200,000	50,000	1 社増
雑収入	0	0	0	利息・寄付本販売代金ほか
前年度繰越金	5,828,851	5,522,837	-306,014	
収入合計	9,297,851	8,950,837	-347,014	

支出の部

単位 (円)

項目	2017 学会年度	2018 学会年度	差額	備考
討論会補助	200,000	200,000	0	
補助金	200,000	200,000		2018 年度大会
要旨集補助	200,000	200,000		
出版事業費	1,710,000	1,560,000	-150,000	
事務費	10,000	10,000		事務通信費
雑誌校正・印刷費	1,350,000	1,350,000		放射化学 37・38 号・英文誌
発送費 (送料、封入作業費等)	150,000	150,000		送料、封入作業等
J-Stage 用 pdf 化費	200,000	50,000	-150,000	2017 は過去分 pdf 化事業費 20 万
会議費	510,000	510,000	0	
理事会	450,000	450,000		6・12・3 月理事会旅費
委員会等	60,000	60,000		
研究会等補助	300,000	300,000	0	
環境放射能研究会	100,000	100,000		2～3 月開催
核化学夏の学校	100,000	100,000		7～8 月開催
その他	100,000	100,000		
事務局経費	740,000	560,000	-180,000	
事務費	100,000	100,000		封筒印刷費、振込手数料など
選挙関係	180,000	0		2018 年は理事会の改選なし
外部委託費用 (会費、会員管理)	450,000	450,000		AS 委託業務費
通信費	10,000	10,000		資料送付費
ネットワーク管理運営費	24,500	35,900	11,400	
プロバイダ費用	24,500	24,500		
ドメイン更新料	0	11,400	11,400	3 年毎更新 (2018-2020)
HP 整備	0	0		
学会賞	90,000	90,000	0	
楯	60,000	60,000		
表彰状印刷、額縁	30,000	30,000		
共催金	5,000	5,000		
支出小計	3,779,500	3,460,900	-318,600	
予備費 (繰り越し)	5,518,351	5,489,937	-28,414	
支出合計	9,297,851	8,950,837	-347,014	

2018 日本放射化学会年会・第62回放射化学討論会 開催情報

第62回放射化学討論会

主催：日本放射化学会

共催：京都大学、京都大学大学院工学研究科、京都大学複合原子力科学研究所

日本化学会、日本分析化学会、放射線安全管理学会、日本原子力学会、日本薬学会

会期：2018年9月18日（火）～20日（木）

会場：京都大学 吉田キャンパス（研究総合8号館、研究総合3号館）

懇親会：カフェレストラン カンフォーラ（京大吉田キャンパス正門入ってすぐ左）

2018年9月19日（水）18：30～20：30

放射化学討論会分科会

【 α 放射体・環境放射能分科会】

世話人：富田 純平（日本原子力研究開発機構）

依頼講演「保障措置環境試料分析の概要と高度環境分析研究棟の紹介」

講演者：安田 健一郎（日本原子力研究開発機構 安全研究センター）

【原子核プローブ分科会】

世話人：大久保 嘉高（京都大学 複合研（旧 京都大学 原子炉実験所））

依頼講演「メスバウアー核をプローブとする機能性物質のキャラクタリゼーション」

講演者：野村 貴美（首都大学東京 理学部）

【核化学分科会】

世話人：笠松 良崇（大阪大学大学院 理学研究科）

【放射化分析分科会】

世話人：関本 俊（京都大学 複合研（旧 京都大学 原子炉実験所））

【若手の会分科会】

世話人：吉田 剛（高エネルギー加速器研究機構）

若手の会設立の経緯、会員資格、会員限定の企画について（活動や助成の内容）等

2018 日本放射化学会総会

日時：2018年9月19日（水）14：15～15：30

場所：京都大学 吉田キャンパス 総合研究3号館 S会場

議事：1. 概況報告

2. 2017学会年度事業報告及び決算報告

3. 2019学会年度事業計画及び予算案

4. その他

提言

研究と産業に不可欠な中性子の供給と
研究用原子炉の在り方



平成30年（2018年）8月16日

日本学術会議

総合工学委員会 原子力安全に関する分科会

日本学術会議ホームページ（<http://www.scj.go.jp/>）より転載

この提言は、日本学術会議総合工学委員会原子力安全に関する分科会研究用原子炉の在り方検討小委員会での審議結果を踏まえ、総合工学委員会原子力安全に関する分科会において取りまとめ、公表するものである。

日本学術会議 総合工学委員会 原子力安全に関する分科会

委員長	矢川 元基	(連携会員)	公益財団法人原子力安全研究協会会長・東京大学 名誉教授
副委員長	柘植 綾夫	(連携会員)	日本工学会元会長・顧問
幹事	越塚 誠一	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
幹事	野口 和彦	(連携会員)	横浜国立大学リスク共生社会創造センター、 センター長、大学院環境情報研究院教授
	大倉 典子	(第三部会員)	芝浦工業大学学長補佐・工学部教授
	上坂 充	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	佐倉 統	(連携会員)	東京大学大学院情報学環教授
	柴田 徳思	(連携会員)	株式会社千代田テクノ大洗研究所長・東京大学 名誉教授、高エネルギー加速研究機構名誉教授、 総合研究大学院大学名誉教授
	関村 直人	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	竹田 敏一	(連携会員)	福井大学附属国際原子力工学研究所特任教授
	松岡 猛	(連携会員)	宇都宮大学非常勤講師
	向殿 政男	(連携会員)	明治大学顧問・名誉教授
	森口 祐一	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	山地 憲治	(連携会員)	公益財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE) 理事・研究所長

日本学術会議 総合工学委員会 原子力安全に関する分科会

研究用原子炉の在り方検討小委員会

委員長	上坂 充	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
副委員長	永井 康介		東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料 科学国際研究センターセンター長・教授
幹事	川端 祐司		京都大学複合原子力科学研究所所長、教授
幹事	村山 洋二		日本原子力研究開発機構研究炉加速器管理部長
	大倉 典子	(第三部会員)	芝浦工業大学学長補佐・工学部教授
	柴田 徳思	(連携会員)	株式会社千代田テクノ大洗研究所長・東京大学 名誉教授、高エネルギー加速研究機構名誉教授、 総合研究大学院大学名誉教授

関村 直人	(連携会員)	東京大学工学系研究科教授
竹田 敏一	(連携会員)	福井大学附属国際原子力工学研究所特任教授
中嶋 英雄	(連携会員)	公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター所長、 大阪大学名誉教授
矢川 元基	(連携会員)	公益財団法人原子力安全研究協会会長・東京大学 名誉教授
内田 俊介		日本原子力研究開発機構 安全研究センター 研究嘱託
宇埜 正美		福井大学附属国際原子力工学研究所副所長・教授
海老原 充		首都大学東京大学院理工学研究科特任教授、首都 大学東京名誉教授
大沼 正人		北海道大学工学研究院量子理工学部門教授
楠 剛		日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター材料 試験炉部長
小原 徹		東京工業大学科学技術創成研究院先導原子力研究所 教授
柴山 充弘		東京大学物性研究所教授
橋本 憲吾		近畿大学原子炉研究所教授
林 眞琴		一般財団法人総合科学研究機構中性子科学センター サイエンスコーディネーター
村田 勲		大阪大学大学院工学研究科教授
山本 章夫		名古屋大学工学研究科総合エネルギー工学専攻教授

本提言の作成に当たり、以下の方にご協力いただいた。

古坂 道弘	北海道大学工学研究院量子理工学部門特任教授
-------	-----------------------

本提言の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務	桑川 泰一	参事官(審議第二担当)
	高橋 和也	参事官(審議第二担当)付参事官補佐
	柳原 情子	参事官(審議第二担当)付審議専門職

1 作成の背景

学术界や産業界では、研究開発に様々な分析手法が用いられている。その中で中性子及び放射光を用いる分析は、他の手法では得られない貴重な情報を与えてくれるが、大型施設が必要であるため、共同利用施設として設置され利用されている。中性子が磁性に感度を持つこと、原子番号の小さい原子核にも感度が高いことから、中性子による分析は、放射光による分析とは相補的な関係にある。また、中性子で各種物質・材料を照射して、放射性同位元素 (RI^{†1}) の製造や材料に対する中性子照射の影響を研究できる。このような特徴を持つため、試験研究用原子炉 (以下「研究炉」という。²⁾ やその関連施設の多くは、学术研究分野のみならず、医療分野や産業利用分野、発電用原子炉に使用する燃材料の照射試験等による原子力発電の安全研究等に広く用いられてきた。

研究炉の重要性は将来にわたって高いにもかかわらず、共同利用者の多い日本原子力研究開発機構 (JAEA[†]) の研究炉 JRR-3[†] や京都大学複合原子力科学研究所の研究炉 KUR[†] は、高経年化が進んでおり、新設計画もないのが現状である。また、平成 25 年 9 月と平成 29 年 3 月には JAEA の研究炉 JRR-4[†] と JMTR[†] の廃炉がそれぞれ決定した。このように、研究炉のあり方について早急に検討しなければならない状況である。

2 現状及び問題点

研究炉の利用は大きく分けると (1) 中性子照射による放射線損傷、放射性同位元素 (RI) の製造、放射化分析などの中性子照射を目的とする利用と (2) 中性子散乱、中性子によるイメージング、中性子捕捉療法 (BNCT[†]) など中性子ビームの利用に分けられ、JMTR は (1) の利用に、JRR-3 や KUR は (2) の利用を中心に用いられてきた。中性子照射を効率的に行う原子炉 (以下「照射炉」という。) としては多くの試料を長期にわたり照射するための照射場を有し、広いエネルギー領域の中性子を発生する原子炉が、また中性子ビームを利用する原子炉 (以下「ビーム炉」という。) としては中性子発生領域が小さく、輝度の大きな原子炉が適している。従って、照射炉とビーム炉を持つことが不可欠である。

原子力エネルギーの利用では以下の課題があげられる。1) 我が国のエネルギー基本計画では、原子力は「エネルギー需給構造の安定性を支える基盤となる重要なベース電源」と位置付けられている。このような状況の中で、原子力の安全の確保は、国民の最も強い要望である。中性子照射環境における機器・構造物の健全性を確保することは最も重要な要素の一つであるが、JMTR が廃炉となり、安全研究が国内ではできない状況にあること。2) 今後、発電用原子炉の廃炉、使用済燃料の処理処分、高レベル放射性廃棄物の最終処分など長期にわたる事業が必要であり、それに携わる人材の育成が課題である。

¹ †印のある用語については<参考資料 6>用語集を参照のこと。

² ここでは、試験研究用原子炉のうち、JRR-3 や KUR のように熱中性子炉で、共同利用に供される炉を検討の対象とした。

中性子照射により生成される RI は放射性医薬品として診断や治療に用いられている。最も多く用いられている診断薬は、半減期 66 時間の Mo-99 の娘核種⁺Tc-99m で標識された薬剤であるが、Mo-99 は 100%輸入に頼っている。平成 23 年 Mo-99 の国産化に関する官民検討会が設置され、JMTR を用いた Mo-99 製造技術の開発の検討が始まった。しかし、JMTR の廃炉の方針でこの国産化計画は頓挫した。

一方、ビーム炉の利用については、共同利用者の最も多い JRR-3 で、新規規制基準への適合対応が続けられているが、事故後 7 年を超える現在、いまだに停止中である。このために、実験装置の整備作業が進まず、最先端の実験を続けることが困難な状況にある。これらの課題を改善するためには、照射炉の早期の建設とビーム炉 JRR-3 の高度化が必要である。JAEA の研究炉の運営能力については、「もんじゅ廃炉⁺」問題で懸念される可能性がある。ので「5 章 研究炉の運営」で詳述した。

新規規制基準への適合の審査に長時間を要している一因は、個々の研究炉の安全に係る特徴を考慮した審査、いわゆるグレーデッドアプローチ⁺への対応が必ずしも十分になされていないためと考えられ、研究炉に対するグレーデッドアプローチの検討は重要である。また、将来の研究炉の利用では、産業利用および原子力発電所の安全性に関する研究開発の比重が増えると予想される。したがって、研究炉の建設や運営に対する費用について、関係省庁で適切な負担の在り方を検討する必要がある。

3 提言の内容

(1) 我が国の科学技術を支える量子ビームである放射光及び中性子を提供する施設の充実重要である。特に、JMTR の廃炉による我が国における照射炉の消滅および JRR-3 や KUR などのビーム炉の高経年化は大きな懸念材料であり、早急な改善が必要である。

(2) 現状で最も重要なことは、照射炉の建設を早急に進めることである。出力は JMTR と同程度 (40~50MWth) とし、照射した試料を扱う実験施設を備える必要がある。研究炉の建設には長期間かかることから、この間のユーザーへの支援を行う必要がある。

(3) 中性子ビームの利用を促進するために、JRR-3 の早期の再稼働を進め、冷中性子源の増強と中性子導管のスーパーミラー⁺化等の高度化を図ることが必要である。また、長期的な観点から時間を要する JRR-3 の次期炉の検討を早急に進めるべきである。

(4) 研究炉の利用では産業利用および原子力発電所の安全性の研究開発の占める割合が大きくなると予想される。研究炉の建設や運営に対する費用について、関係省庁で適切な負担の在り方を検討する必要がある。また、将来の原子力発電所の廃炉や使用済燃料の処理処分等長期にわたる事業を支えるための人材育成が必要であり、研究炉は人材育成に大きく貢献できる。

目 次

1	はじめに.....	1
2	研究炉の現状.....	3
3	照射炉について.....	7
	（1） 照射炉の必要性.....	7
	（2） 照射炉に必要な機能と要件.....	8
4	ビーム炉について.....	12
	（1） ビーム炉の必要性.....	12
	（2） ビーム炉に必要な機能と要件.....	12
	（3） JRR-3 の高度化.....	13
5	研究炉の運営.....	15
	（1） 運営組織.....	15
	（2） 共同利用体制.....	16
	（3） 人材育成.....	18
6	まとめ.....	19
7	提言の内容.....	20
	<参考文献>.....	21
	<参考資料1> 審議経過.....	22
	<参考資料2> 研究炉の安全性の特徴.....	23
	<参考資料3> 照射炉の利用ニーズ.....	24
	<参考資料4> JRR-3 と J-PARC における利用体制について.....	28
	<参考資料5> 研究炉の燃料問題.....	30
	<参考資料6> 用語集.....	32

1 はじめに

研究炉の在り方に関して日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会は平成 25 年に提言を発出した[1]。そこでは研究炉の役割と必要性、国内外の現状、課題と対策が議論されていて、研究炉の建設には長期間かかることから後継について早急に適切な将来計画、またその運用体制を含めたグランドデザインを描くことを早急に進める必要があるとされている。本提言では、研究炉に対する近年の急速な状況の変化に対応するために具体的な提言をまとめた。

学術界や産業界では、研究開発に様々な分析機器が用いられている。分析に用いる機器の中で放射光および中性子を用いる分析には大型施設が必要で、各大学や各企業が単独で持つことは現実にはできない。このため共同利用施設として設置され利用されている。中性子は、磁性に感度を持つこと及び原子番号の小さい核種にも感度が高いことから放射光と相補的な分析手段である。このために欧米では放射光を利用する大型施設³と中性子を利用する原子炉及び加速器を用いた中性子施設⁴が設置されている。我が国では放射光施設として Spring-8[†]等、原子炉施設の照射炉として JMTR、ビーム炉として JRR-3 等、加速器中性子源として J-PARC[†]が設置されてきた。この中で、JMTR の廃止、JRR-3 と KUR の高経年化に対応する必要がある。

(1) 研究炉の安全上の特徴

研究炉は、発電炉に比べて低出力であり（大型の研究炉でも電気出力 110 万 kW の発電炉の 1%程度）、崩壊熱や炉内に蓄積される放射エネルギーもけた違いに小さい。また、多量の冷却材を保有するプール内に設置されるため、全電源喪失の場合でも自然対流で冷却され、燃料の損傷には至りにくい [1]。

東京電力福島第一原子力発電所事故を受けて、新規規制基準が設けられ、特に、地震・津波や竜巻等の自然現象等に対する規制が強化された。研究炉は炉型や出力が多種多様であり、異常時の状況は炉毎に異なるので、これに適切に対処するためには、個々の炉の安全上の特徴及びリスクの大きさを考慮したグレーデッドアプローチの適用が有効である。＜参考資料 2＞に、JRR-3 の安全上の特徴を記す。

(2) 照射炉の役割

我が国のエネルギー政策ではベストミックスという観点から、2030 年時点の原子力エネルギーの利用を 20～22%[2]として、原子力発電所の再稼働が進められている。この原子力エネルギー利用は、原子力発電所の安全が大前提となっている。複雑な工学システムである原子炉において、安全に寄与する要素のうち中性子の照射環境下での機器・構造物の健全性を確保することは最も重要な要素の一つである。具体的には圧力容器やその内部の構造材料の中性子照射による劣化の理解と対策、燃料破損のメカニズムと対策、事故耐性燃料被覆管などの過酷事故対策、水化学管理技術など多岐にわたり、照射炉なくしては対策が立てられない。さらに、照射炉は核融合炉やより安全な先進炉の材料開発にも不可欠

³ 第 3 世代の放射光施設として欧州は ESRF[†]、米国は APS[†]

⁴ 原子炉中性子源として欧州は HFR[†]、米国は HFIR[†]、加速器中性子源として欧州は ISIS[†]、米国は SNS[†]。

である。産業利用では、放射性同位元素 (RI)、半導体用のシリコンウェハー、He-3 の製造など多大な利用ニーズがある[3] (参考資料3 参照)。

(3) ビーム炉の役割

原子炉で生成される中性子を用いた分析手段は、中性子が磁性に感度を持つこと、原子番号の小さい核種にも感度が高いことから放射光と相補的な分析手段である。放射光や X 線の散乱は電子との相互作用で散乱し、およそ原子番号に比例するが、中性子の散乱はそのような規則性はなく、原子核との散乱で特に水素との散乱が大きく、原子番号の大きな元素で構成された材料中に水素が入っているような場合、X 線や放射光では非常に観測しにくい、中性子では観測しやすいことが大きな特徴である。生物内の組織の中に存在する水素は組織の機能に深く関わっていて、この水素を観測することにより機能に関する情報が得られることから、創薬やたんぱく質などの機能の解明にも用いられている。また中性子は磁性粒子であり、磁性原子との相互作用で散乱が起き、物質の磁気構造を容易に決定できる、などが特徴である。このように中性子ビームの利用は、他の手段では得られない情報が得られるので、物性物理や材料科学で欠かせない測定手段となっていて、新機能材料の開発、酵素やたんぱく質の機能の解明、創薬などの分野、BNCT による医療分野で研究開発に不可欠な手段となっている。

中性子を発生させる施設としては、原子炉及び加速器施設があり、規模の大きな原子炉としては原子力研究開発機構 (JAEA) の JRR-3 および JMTR が、加速器施設としては大強度陽子加速器施設 (J-PARC⁺) が設置されている。現在は JRR-3 が稼働していないために J-PARC が唯一の先端的大型中性子源となっている。

学術研究や産業利用で今後も中性子が大きな役割を果たす可能性は高く、JRR-3 の再稼働が強く望まれると同時にその高度化は学術研究や産業利用にとって喫緊の課題といつてよい。

(4) 研究炉の運営組織体制について

我が国の熱出力1MW以上の研究炉はJAEAと京都大学複合原子力科学研究所が運営している。しかし、原子炉に対する安全規制やセキュリティが厳しくなり、大学で研究炉を維持管理することは困難となっている。そのため、研究炉の運営組織としてはJAEAが最有力な候補である。

先端的な大型施設である J-PARC は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK⁺) と JAEA の両者の共同運営で成果を上げている。また、JRR-3 の利用に係る運営面では東京大学原子力専攻及び東京大学物性研究所と JAEA が協力することで、大きな成果を挙げてきた。これらの状況は大型施設で大きな成果を挙げるには利用者の意見を大型施設の運営に反映させることが重要であることを意味し、大型施設の建設の場合は設計段階から利用者の意見を取り入れる組織体制が必要であることを示している。これまで我が国の照射炉である材料試験炉 (JMTR) は JAEA と東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センターが協力して研究成果を出してきた。照射炉の建設・運営にあたり JAEA と量子エネルギー材料科学国際研究センターがこれまで以上に緊密な連携を取って進めることが望まれる。

(5) 研究炉の建設及び運営上の経費の考え方

今後、中性子を用いた分析は産業利用の中で重要性が認識され、需要が増加すると考えられる。また、原子力発電の分野では発電炉の新設は困難が大きく施設の使用期間を延長する要望が増えることが予想される。このため安全性の研究開発のため照射炉の利用は増加することが予想される。このような状況に対応するためには関係省庁で適切な費用負担について検討する必要がある。

(6) 人材育成の必要性

研究炉を利用した人材育成は、各種の研究者の育成だけでなく、発電炉を運転する技術者の育成においても重要である。将来、原子力発電所の廃炉、使用済燃料の処理処分では長期にわたる事業が展開される。このための人材育成が必要であり、研究炉は人材育成に重要な役割を果たすことができる。このような観点からも、早期の照射炉の建設と JRR-3 の高度化は必要である。

(7) 研究炉の燃料問題

研究炉の燃料問題は、＜参考資料5＞に示した。燃料について、今後の開発状況を勘案しつつ、ウラン・シリサイド燃料[†]及びウラン・モリブデン燃料[†]の双方を候補として検討する必要がある。使用済燃料について直接処分も含めた使用済燃料の最終処理処分について早々に見直す必要がある。

2 研究炉の現状

研究炉は大きく分けて、表1に示すように、熱出力に応じて、数Wクラスの臨界集合体実験装置、数MW～20MWクラスのビーム炉及び数十MWクラスの照射炉に大別される。臨界集合体実験装置は、炉物理実験が主要目的となるが、冷却系統を不要とし、システムがシンプルであることから、学生や発電所に関連する社会人などの研修・人材育成に最適である。照射炉は、発電炉の安全研究や核融合炉・先進炉などの開発を主要目的として燃料・材料照射損傷に関する様々な研究に活用されるだけでなく、放射化分析などの基礎科学に加えて、医療用 Mo-99 を含む放射性核種の製造やシリコンドーピング[†]への活用などの産業利用が世界的にも広がりを見せている。一方、ビーム炉は、中性子科学、中性子実験技術応用による産業イノベーション、BNCTによる医療への活用、放射化分析等で先進的研究のツールとして活用されている。

表1 研究炉の種類

種類	主要目的	炉心内中性子束 (n/cm ² /s)	年間の燃料消費	期待される成果
数 W クラスの臨界実験装置	臨界安全、炉物理実験	10 ⁵ ～10 ⁷ 程度	0	発電炉を含む炉物理特性研究、学生等を含めた研修
数 MW～20MW クラスのビーム炉	中性子科学、中性子ラジオグラフィ、RI 製造等	10 ¹³ ～10 ¹⁴ 程度	数体～20 体程度	中性子科学、中性子ラジオグラフィによる産業イノベーション、BNCT による医療への活用
数十 MW クラスの照射炉	燃材料の環境制御した照射試験、種々のパラメータ試験による照射損傷基礎研究、RI 製造	5×10 ¹⁴ 程度	60 体以上	発電炉の開発、安全、RI 製造

(出典) 原子力安全に関する分科会で作成

図1に示すように、照射炉の場合、炉心を比較的大きくすることにより、垂直実験孔の数を多く、その径も大きく設計することができる。均一で多量の照射や、複合環境下での燃料・材料のその場試験等（照射リグ[†]内に試験片への荷重制御や試験片の環境制御並びにそれらの計装等）の高度な研究が可能となり、材料の照射損傷メカニズム研究等では中性子束、エネルギー等をパラメータとする先進的な照射試験が可能となる。一方、ビーム炉の場合、一般的に中性子源となる炉心部は軽水減速、軽水冷却で、その外郭に重水タンクを配置し、重水タンク内で減速された中性子をビームとして外部に取り出す設計になっている。重水領域での中性子ビームの性能確保（中性子束、エネルギー）のために、炉心部はコンパクトに設計される。このため、燃料・材料照射やRI製造などに必要な垂直実験孔の数は少なく、径も小さくなる。また、重水領域では、中性子エネルギー分布に外乱を与えないために、垂直実験孔に挿入される燃・材料照射試験片、特に高速中性子源となる燃料の種類と量が制限される。以上のことから、先進的照射試験研究およびMo-99などのRI製造に適した照射炉と中性子ビーム性能を第一義に設計され、利用されるビーム炉をそれぞれ有することが不可欠となる。

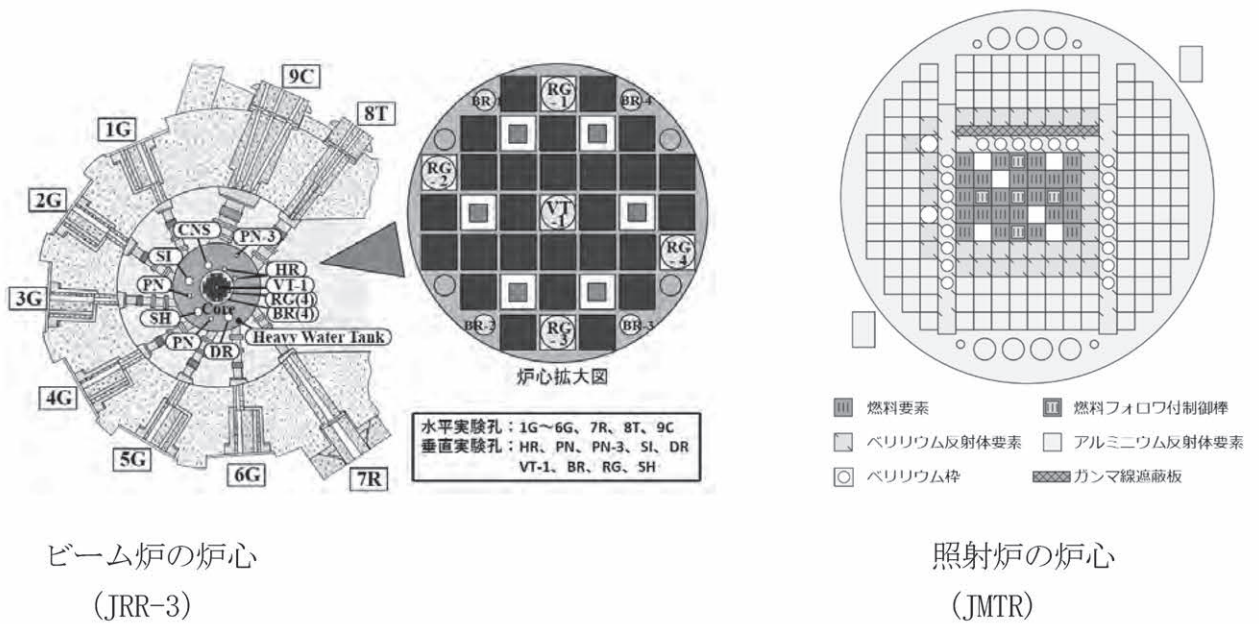


図1 ビーム炉と照射炉の炉心

(出典) 日本原子力研究開発機構パンフレット New JMTR

日本ではこれまで 28 基の研究炉が建設されたが、その多くは高経年化又はその役割を終えたため廃止措置に移行し、現在運転継続予定の研究炉は表2に示す9基である。この内、原子炉安全研究炉 (NSRR[†]) は反応度事故を模擬した燃料の安全研究、定常臨界実験装置 (STACY[†]) は硝酸ウラン溶液燃料の臨界安全研究、高温工学研究炉 (HTTR[†]) は高温ガス炉開発、高速実験炉 (JOYO[†]) は高速炉開発に特化した研究炉である。他は臨界実験装置相当が3基、ビーム炉が2基 (JRR-3、KUR) で、照射炉は平成29年3月のJMTRの廃炉決定により、我が国から姿を消した (ビーム炉の2基は、それぞれ垂直実験孔を有し、燃料・

材料の照射試験を利用目的のひとつに掲げているが、前述のように、少数でシンプルな照射試験に限られ、本格的な照射試験炉の代替えとなるものではない。

表 2 運転継続予定の日本の研究炉

研究炉	管理者	形式	出力	中性子束 (n/cm ² /s)	冷却減速	ビーム ポート	利用目的	運転 年数
UTR KINKI	近畿大学	教育訓練用小型炉	1W	熱 1.0×10 ⁷ 高速 1.0×10 ⁶	/軽水	無	教育訓練、中性子ラジオグラフ、放射化 分析	56
JRR-3	JAEA	プール	20MW	熱 2.7×10 ¹⁴ 高速 1.4×10 ¹⁴	軽水/軽水	有	中性子散乱実験、Si ドーピング、RI 製 造、中性子ラジオグラフ、年代測定、材 料照射試験	27
TOSHIBA NCA	東芝	臨界実験装置	0.2kW	熱 1.0×10 ⁹ 高速 3.0×10 ⁹	軽水/軽水	無	燃・材料照射試験（基礎実験）	54
KUR	京都大学	タンク	5MW	熱 6.0×10 ¹³ 高速 6.5×10 ¹³	軽水/軽水	有	中性子ラジオグラフ、中性子散乱実験、 放射化分析、BNCT、教育訓練、材料照 射試験、	53
HTTR	JAEA	高温ガス炉	30MW	熱 7.5×10 ¹³ 高速 2.0×10 ¹³	He	無	高温ガス冷却炉開発	19
STACY	JAEA	均質炉	0.2kW				窒化ウラン溶融燃料臨界安全研究	22
KUCA	京都大学	臨界実験装置	0.1kW	熱 1.0×10 ⁹ 高速 1.0×10 ⁹	軽水、空気/ポリ エチレン、空気	無	炉物理 教育訓練	43
NSRR	JAEA	トリガ（反応度事故模擬 用パルス炉）	300kW	熱 1.9×10 ¹² 高速 4.0×10 ¹⁵	軽水/軽水	無	燃・材料安全研究	42
JOYO	JAEA	Na 冷却高速炉	140MW	高速 4.0×10 ¹⁵	Na	無	高速増殖炉開発、教育訓練	40

（出典）IAEA RRDB (Research Reactor Database) に基づき原子力安全に関する分科会で作成

一方、中性子ビームの利用に関して、共同利用者の最も多い JRR-3 は、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえて策定された新規制基準への適合対応が続けられているが、事故後 7 年を超える現在、いまだに停止中である。このために、実験装置の整備作業が進んでおらず、最先端の実験を続けることが困難な状況である。また、KUR は、約 3 年の審査期間を経て平成 29 年 8 月に再稼働がなされた。このように新規制基準への適合の審査に長時間を要している一因は、個々の研究炉の安全に係る特徴を考慮した審査、いわゆる

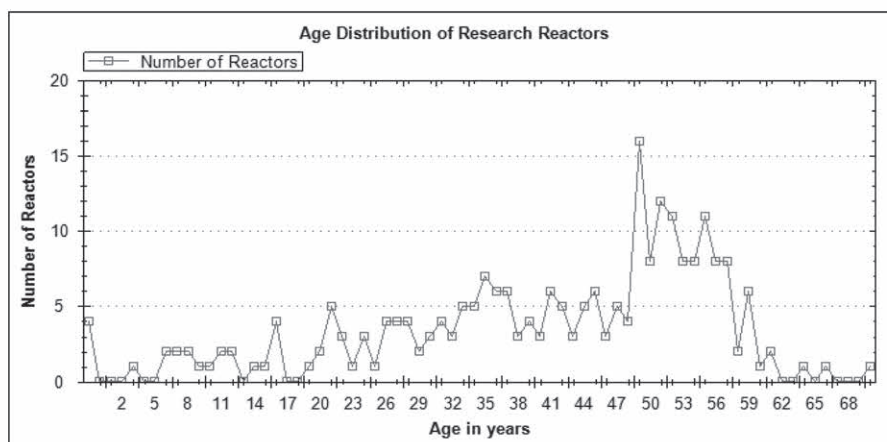


図 2 世界の研究炉運転年数

（出典）IAEA RRDB (Research Reactor Database)

グレーデッドアプローチへの対応が必ずしも十分になされていないためと考えられる。原子力発電所と研究炉の熱出力は100倍ほど異なることからリスクの大きさも大きく異なる。研究炉の建設や運転管理において、リスクの大きさを考慮するグレーデッドアプローチの対応は重要であり、研究炉関係者は早急に検討する必要がある。

世界の研究炉も、図2に示すように初臨界から45年以上経過したものが多く、高経年化が課題になっていることから、多くの研究炉は廃止されるとともに、新たな建設が計画されている。表3に研究炉の廃止、運転継続、及び新たな建設計画の状況、表4、5に新たに建設中、計画中の研究炉を示す。

表3 世界の研究炉の状況

Status	Number of All Countries
Operational	222
Temporary shutdown	19
Extended shutdown	10
Permanent shutdown	79
Under decommissioning	48
Decommissioned	375

(出典) IAEA RRDB (Research Reactor Database)

表4 新たに計画中の研究炉

Country	Facility Name	Type	Thermal Power (kW)	Last Update
Argentina	RA-10	POOL	30000	2014. 4. 7
Belgium	MYRRHA	FAST	85000	2014. 1. 8
Brazil	RMB	POOL	30000	2014. 4. 7
China	TFHR Thorium Pebble Bed	EXPERIMENTAL	2000	2013. 10. 7
China	TMSR-LF1	EXPERIMENTAL	2000	2018. 1. 2
China	TMSR-SF1	EXPERIMENTAL	10000	2018. 1. 2
Korea, Republic of	KJRR	POOL	15000	2014. 4. 7
Netherlands	PALLAS		0	2010. 12. 28
Thailand	SUT MNSR	MNSR	45	2017. 8. 1
Ukraine	Multipurpose RR	POOL	20000	2013. 4. 24
United States of America	HT3R	HE COOLED	25000	2013. 6. 7
Viet Nam	Multipurpose Research Reactor	POOL, IRT	15000	2014. 3. 20

(出典) IAEA RRDB (Research Reactor Database)

表5 新たに建設中の研究炉

Country	Facility Name	Type	Thermal Power (kW)	Last Update
Argentina	CAREM 25	PWR PROPULSION	100000	2013. 9. 5
France	REACTOR JULES HOROWITZ	TANK IN POOL	100000	2017. 5. 29
Russian Federation	IRV-2M	POOL	4000	2017. 6. 29
Russian Federation	PIK	TANK	100000	2017. 6. 2
Russian Federation	MBIR	FAST, POWER	150000	2017. 6. 6
Saudi Arabia	LPRR	POOL	30	2016. 12. 16
Ukraine	KIPT Experimental Neutron Source	SUBCRIT	0.19	2017. 08. 04

(出典) IAEA RRDB (Research Reactor Database)

3 照射炉について

(1) 照射炉の必要性

東京電力福島第一原子力発電所事故以降、原子力エネルギーに対する幅広い議論が行われてきた。一方、国のエネルギー基本計画では、原子力は「エネルギー需給構造の安定性を支える基盤となる重要なベース電源」と位置づけられ、すでに再稼働を果たした原発が存在する。このような状況の中、原子力の安全の確保は、その賛否にかかわらず国民の最も強い要望であり、安全性を判断するために、科学的立場に基づいた知見を与えることは学术界の責任である。さらに、海外に目を向けると、特に原子力の経験が浅いアジア各国では今後原発の新設・増設が計画されている。また、中国や韓国の原子力発電所の過酷事故は我が国へ直接の影響の可能性がある。過酷事故を経験した我が国だからこそ、これらの国々の原子力の安全に科学的立場から貢献する責任があるといえる。

複雑な工学システムである原子炉において、安全に寄与する要素は様々であるが、中性子による照射環境という、他の工学システムではない環境下の機器・構造物の健全性確保は最も重要な要素の一つである。具体的には、圧力容器や炉心構造材料の中性子照射による劣化の理解と対策（照射損傷の基礎学理研究を含む）、燃料の破損メカニズムの解明と対策、事故耐性燃料被覆管（耐水素脆化、水素発生抑制等）などの過酷事故対策、水化学管理技術（材料腐食抑制）に係る炉内構造材料の照射誘起応力腐食割れ（IASCC⁺）など、多岐にわたる。

原子力発電所の事故では、工学的安全設備で対応し重大事故の発生、拡大、炉心溶融を防止し、原子炉を正常に停止させる。これは深層防護⁺という第3層までの対応である。第4層では、炉心溶融に至っても、事故の影響を緩和し、放射性物質の放出を最小化する対策を講ずることにより対応する。第4層では、従来の工学的安全設備に頼るだけではなく、事故の状態を早期に把握し、その影響を最小化するために、事前に準備し、日常的に訓練したアクシデントマネジメントに則り、最終的には人の操作でプラントを守り、放射性物質の環境への放出を抑制する対応を取るものである。深層防護第4層への対応を徹底するためには、今後生じる可能性のある設計変更、設備変更に対応して、炉心溶融事象発生時の放射性核分裂生成物の挙動の把握が必須であり、アクシデントマネジメントに的確に取り入れて、徹底すると共に、技術移転を図ることが必須となる。これまで炉心溶融事象発生時の核分裂生成物の挙動は、フランス カダラッシュ研究所のPhébus研究炉（熱出力38MW）での燃料棒24本を含む大型実験で、中性子によって駆動され、燃料体をメルトダウンさせて、燃料体から放出する核分裂生成物が圧力容器を透過してどの程度格納容器内に漏洩するかという大型実験プロジェクトを実施し、貴重な実験データを提供してきたが[4][5]、2010年に全プロジェクトを終了した。既に終了したPhébus研究炉でのプロジェクトのレベルを超え、燃料集合体崩壊状態のオンライン測定機能を有する実験設備を開発し、我が国がリーダーシップを取っての国際プロジェクトを推進する必要がある。

また、照射炉は、上記の既存軽水炉の安全性に対する寄与だけでなく、核融合炉やより安全な先進炉の材料開発にも不可欠である。さらに、使用済核燃料の地層処分を検討

する際の地層の安定性等を評価する場合においても、重要な役目を果たすことが期待されている。

産業利用としては、十分な中性子束強度で、多くの照射孔を利用して医療用 Mo-99 などの RI を製造する能力が期待されている。また、パワーデバイス向けのシリコン半導体の製造では、12 インチ程度の大型の照射孔において均一な照射を行うことにより、最高グレードのシリコンウェハの供給も期待される[3]（参考資料 3 参照）。近年では、空港等への He-3 を使った中性子検出器の大量配備等により需要が急増している He-3 の供給が期待される[3]（参考資料 3 参照）。このように照射炉は、我が国の幅広い科学技術や産業にも貢献でき（図 3 参照）、その利用価値は極めて高い。照射技術は研究・利用目的ごとのオーダーメイド的要素が高いため、最先端の研究・技術保持、そしてそれらの人材育成には、照射炉を国内に保有することが欠かせない。また、照射した試料の多くは強く放射化するため、海外炉を利用する場合、ホットラボ⁺の使用や試料の保管などに多額の経費を支払う必要がある。このためビーム利用の場合とは異なり、国の大型プロジェクトを除いて、個別の研究者が利用料を支払って海外炉利用することは、現実的に困難である。なお、東北大学金属材料研究所では JMTR 停止以降、全国共同利用のための代替照射として海外炉（主としてベルギー BR-2 炉）を利用しているが、経費などの理由により JMTR 稼働時の 1/4 程度以下しか照射できていないのが現状である。

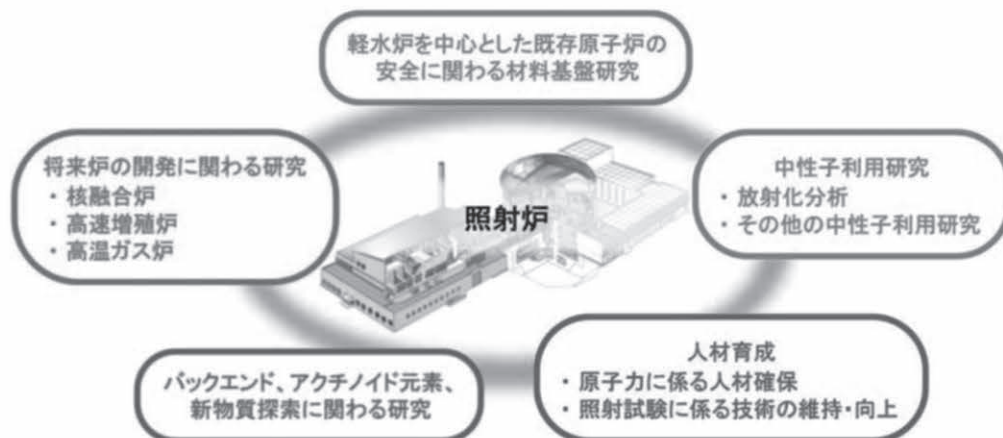


図 3：照射炉の必要性（参考文献[3]より）

以上の照射炉の研究ニーズや、国内に照射炉を保有する必要性に関しては、JMTR 運営・利用委員会 照射炉利用ニーズ調査専門部会、「照射炉の照射利用ニーズに関する調査報告書」（平成 28 年 12 月）[3]や、日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会提言「研究用原子炉の在り方について」（平成 25 年 10 月）[1]に詳述されているが、上記の内容は、これら報告の内容とも符合している。

（2）照射炉に必要な機能と要件

照射炉には、上述のように、現行軽水炉の安全性向上・高度化、水化学による構造材

の腐食抑制技術、過酷事故対策、次世代炉開発等に関する材料・燃料照射試験及び照射損傷メカニズム解明などの基礎研究に加えて、放射化分析、Mo-99 を含む RI 製造などが求められる。これらの照射を実施するための照射炉には次のような機能、要件が必須である。

① 中性子束、スペクトル、制御柔軟性

図4に世界の主要な研究炉の中性子束を示す。JMTR は熱中性子、速中性子共 1×10^{14} n/cm²/s であり、同程度の中性子束が必要である。材料の加速照射の観点からさらに高中性子束が望まれる場合があるが、ガンマ線による発熱が高くなり、適切な照射温度制御ができなくなることを考慮して設計する必要がある。

また、中性子エネルギースペクトルに関しては、軽水炉分野での照射利用では、軽水炉にできるだけ近いスペクトルが望ましい。一方で、放射化分析や RI 製造、核融合炉や先進炉材料の開発など、多様な照射試験に対応する必要がある。さらに、照射試験の内容は今後大きく変遷する可能性もある。このため、炉心の燃料、制御棒、垂直実験孔の配置並びに垂直実験孔の大きさを自由に変えることによって、炉心および周辺部の中性子スペクトルを柔軟かつ精度良く制御できることが重要な要件である。

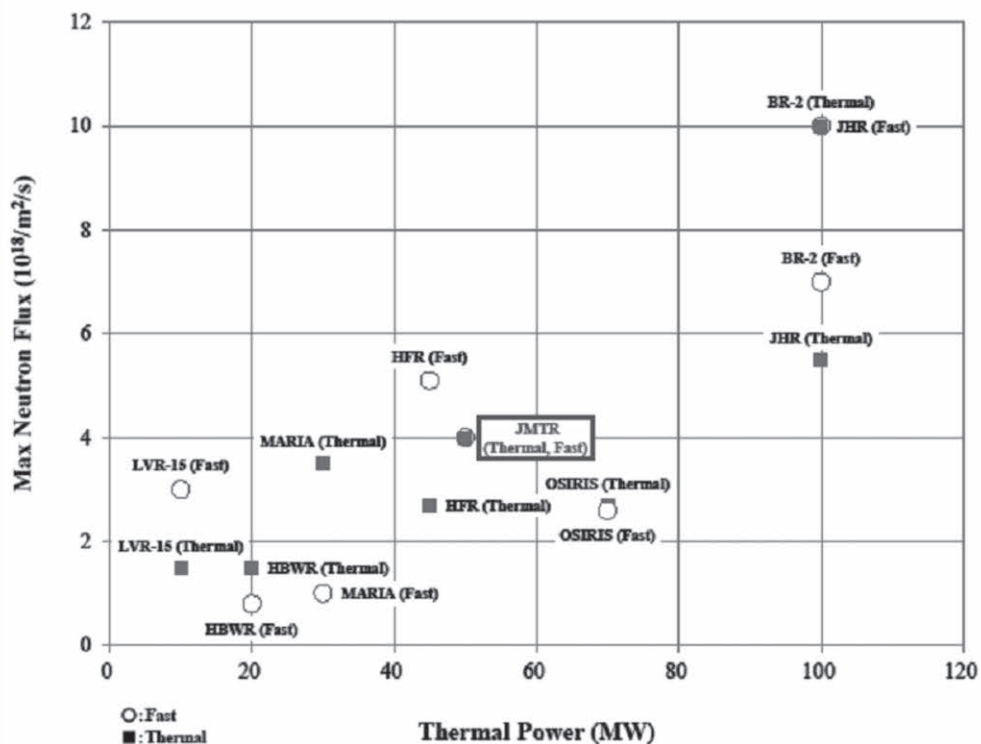


図4：世界の主要な照射炉の中性子束

(出典) IAEA RRDB に基づき当分科会で作成

② 照射場の大きさ、均一性

様々な形状、大きさ、複合環境下でのその場測定など多種多様な照射を行うために、十分な照射場の大きさが必要である。JMTR の場合、内径 42mm~67mm の有効に使用できる垂直実験孔が 60 であるが、同程度の照射場の大きさは必要である。また、様々な

照射試料の高精度な比較が必要な材料基礎研究や、大型試験片を用いる研究は、破壊靱性試験[†]を予定しているため、また、シリコンドーピングなどにおいて均質な照射場が必要である。均一な照射場は、温度の均一性にとっても重要である。

③ 温度制御

精度の高い温度制御技術は極めて重要であり、少なくとも、JMTR でも実績のある $300\pm 2^{\circ}\text{C}$ 程度の温度制御技術は軽水炉の安全性の研究には必須である。この温度域での制御を容易にするために、冷却材温度は 50°C 程度にすべきである。また、先進炉の開発のためには、より高温での照射時温度制御 ($500\pm 10^{\circ}\text{C}\sim 1200\pm 50^{\circ}\text{C}$) も可能にする必要がある。大型試験片の精度良い温度制御のためには、試験片内のガンマ線による発熱を抑えることが有効であり、ガンマ線強度の低減化技術が求められる。なお、温度制御のためには、通常キャプセル内の試料に温度計測用の熱電対が装荷され、電気ヒータなどで試料の温度を制御する。この場合、熱電対やヒータの導線などを炉外装置まで導くために、キャプセルが長くなり通常のキャスクに装荷することができない。そのためにキャプセルを切断して短尺化するための隣接プールが必要となる。

④ 稼働率

軽水炉高経年化研究や先進炉材料の研究などにおいて、有為な期間で十分な照射量を確保するためには、原子炉の高稼働率が必須であり、海外の照射炉並に年間 250 日程度の安定した運転を目指す必要がある。また、高稼働率は RI 製造などの産業利用にとっても重要である。

⑤ ループ試験設備

一次冷却系の水化学に関する照射試験研究や炉内構造物の照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 試験では、水ループ、ガスループ等のループ試験設備の設置が求められる。沸騰水型原子炉 (BWR)、加圧水型原子炉 (PWR) の水化学環境を模擬できる高温高压水ループとともに、照射場近傍からのサンプリング機能や水環境及び材料特性のその場測定技術が必要である。また、照射の水環境を炉外装置で制御するため、放射化した腐食生成物が炉外に放出される。このため、十分な放射線遮蔽能力があるループキュービクル[†]が必要となる。ループキュービクルは、軽水炉燃料出力急昇試験における出力変動中の燃料被覆管のペレット-被覆管相互作用 (PCI) 破損を検出するために放出される核分裂生成物 (FP) を炉外で測定する場合にも必要である。

⑥ 再照射のための炉プール

軽水炉高経年化研究における炉心構造材の IASCC 研究や高燃焼度燃料の照射試験研究では、他の照射場 (JMTR の簡易キャプセル、加速器、発電炉等) でベース照射した材料を IASCC その場試験キャプセルで再照射する。このように高放射線試験体を装荷した長尺のキャプセルを原子炉炉心に挿入するためには、放射線遮蔽に十分な深さのある炉プールが必要である。

⑦ ホットラボや照射後実験施設と原子炉の連携

再照射は上記の IASCC 研究や高燃焼度燃料の照射試験研究のみならず、圧力容器の照射脆化研究などでもニーズがある。そのためには、照射済み試験片の加工技術や照

射キャプセルへの再装荷・組立技術等も必要であり、これらを行うホットラボとの連携は欠かせない。このような IASCC 試験では、他の照射場で照射した材料に亀裂発生、進展測定リグや荷重負荷治具を装荷して長尺キャプセルに装荷する。このような、先進的照射試験を行うには、原子炉とホットラボがカナルで直結していることが不可欠である（図5参照）。また、最先端の材料分析能力を有する照射後実験施設との連携は欠かせない。このため、そのような照射後実験施設および研究者集団に隣接して炉が設置されることが不可欠である。

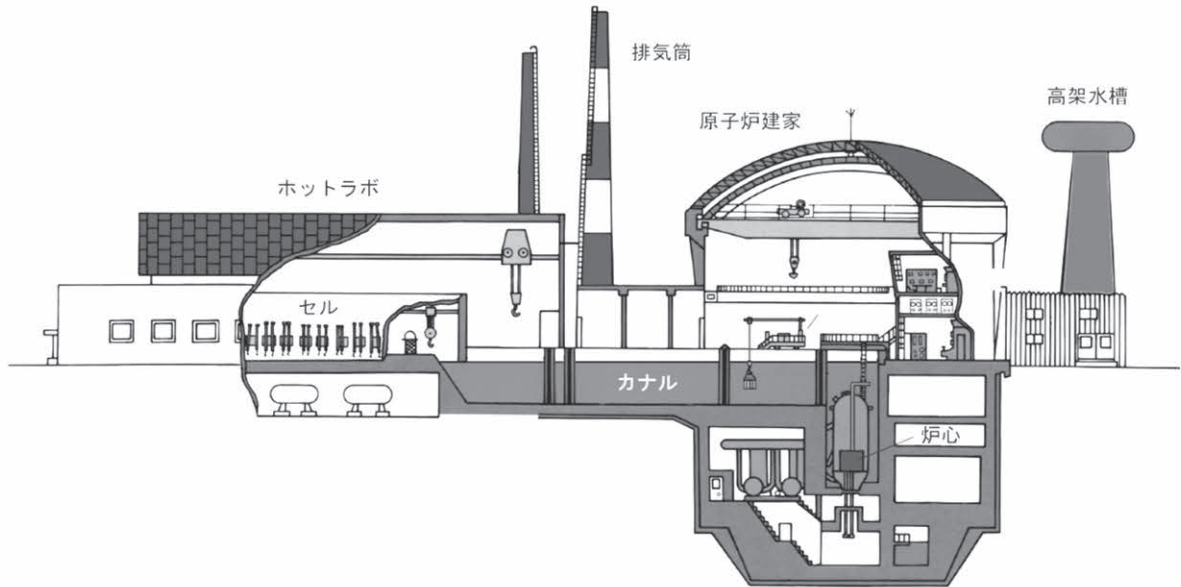


図5：照射炉とホットラボ

(出典) 日本原子力研究開発機構パンフレット New JMTR

⑧ 使用済燃料貯蔵施設

照射炉は大量の使用済燃料が発生する（JMTR の場合年間 63 体）。これらの燃料は一定期間冷却した後米国に送っている。しかし、新たな照射炉建設後に米国が日本の使用済燃料を受け入れる保証はない。このことから、新たな照射試験炉で発生する使用済燃料を貯蔵する貯蔵施設を建設する必要がある。

⑨ 核燃料

現在世界の研究炉の多くは、低濃縮ウラン・シリサイド燃料を使用しているが、炉心性能を高めるためにウラン装荷量が大きくなるウラン・モリブデン燃料への移行を検討している。新たに建設する照射炉については、シリサイド燃料炉心と平行してモリブデン燃料炉心の検討を行うことが望まれる（詳細は<参考資料5>）。なお、可燃性毒物[†]は、燃料の経済性向上とともに、燃料の燃焼による原子炉反応度変化を抑え、運転中の中性子束分布変化を小さくすることができること、また照射場の安定性の観点からも有効である。

⑩ 研究炉を設置する場合の近隣住民の理解

重要な要件として、研究炉の設置に対する近隣住民の理解が挙げられる。研究炉の

周辺に各種の実験施設が必要であることは既に記載した通りである。このような環境を備えた場所として、JAEAの原子力科学研究所及び大洗研究所、京都大学複合原子力科学研究所がある。これらの地域では、研究炉に対する地域住民の理解が得られているので、有力な設置場所といえる。

4 ビーム炉について

(1) ビーム炉の必要性

東京電力福島第一発電所事故後、新たな規制基準が定められ、研究炉で利用者数の最も多かったJRR-3は、新規制基準対応に時間がかかり、事故から7年を過ぎた今も運転再開がなされていない。日本学術会議基礎医学委員会・総合工学委員会合同放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会では、研究炉の長期停止による研究開発への影響をアンケート調査により調べた[6]。その結果によると事故以前のJRR-3の利用者数は実数でおよそ1400名と多くの研究者が利用していて、中性子回折や中性子散乱、中性子イメージング、即発ガンマ線分析などの中性子ビーム利用が約7割を占めている。このことから中性子ビームを用いた分析法の有用性が示されている。

中性子ビームの利用は、パルス中性子源としてのJ-PARCと定常中性子源としてのJRR-3が主要な中性子源として利用されてきていて、産業利用でも大きなニーズが生じている。定常中性子源の特徴である大強度で安定したビームを得られることから、結晶構造解析、分光、中性子イメージング、即発ガンマ線分析など、産業界で利用し易い分析法であるため、今後一層の利用が期待され、中性子ビームを用いた分析法が我が国の科学技術力を支え、延いては経済を支える大きな役割を果たすと予想できる。

JRR-3は7年以上稼働していないために、実験設備の改良や高度化が遅れていて、これを改善することは喫緊の課題である。JRR-3の高度化は中性子科学会からも要望されているが[7]、実現しておらず早急に改善することが求められる。

(2) ビーム炉に必要な機能と要件

定常中性子源から発生する中性子ビームを用いた学術利用の有用性は上述のとおりであるが、目的や実験手法に応じその利用形態は多種多様に富んでいる。これらの需要に応じた中性子ビームを持続して供給するためには、次のような機能、要件が必須である。

① 目的に応じた中性子束及びスペクトルの利用

(1) 実験装置ごとに要求される中性子束及びスペクトルは異なるため、多様なビームを取り出す仕組みが必要、(2) 熱中性子束、冷中性子束ともに実験装置に供給される中性子束密度については $10^9\text{n/cm}^2/\text{s}$ のオーダーが必要。

② 高稼働率の確保

(1) 需要を満たすためには、ビーム強度を増強する以外に高稼働率を確保し、利用時間を十分に確保することが必須、(2) 効率的な実験を行うためには、汎用性の高い機器の使用と共に、維持管理及び交換の容易な機器を開発し、定期検査の期間を短縮することが必須、(3) 冷中性子源装置(CNS)等の利用設備の異常が原子炉の運転

に影響を与えない仕組みとし、原子炉がスクラム⁺するリスクを最小限にする、(4)スクラムした後の再稼働までの時間を短縮する仕組みを取り入れる。

③ 利用者の利便性の確保

(1)実験エリアは、将来のニーズも踏まえて高い汎用性と高利用率を確保するため、ビームホールを複数方向に建設し多くの実験装置を整備できる配置とする、(2)セキュリティの観点から、核物質防護エリアと実験エリアを区別し、利用者の出入りの容易さを確保する。

現状の JRR-3 はこれらの機能と要件をすべて備えているわけではなく、次期炉の検討の際に必要なものである。当面は JRR-3 の高度化で対応するわけであるが、高度化の際にこれらの必要な機能と要件の中で取り入れられるものは取り入れることが望まれる。

(3) JRR-3 の高度化

① 原子炉ならびに冷中性子源の高度化

現在の JRR-3 は熱出力 20MW の研究炉で、研究炉の規模としては、米国 NIST⁺ の NBSR⁺、オーストラリア ANSTO⁺ の OPAL⁺、ドイツミュンヘン工科大学の FRM-II⁺ 原子炉と同じである。しかし、原子炉設計ならびに中性子ビームを取り出す部分の設計が建設当初のままであり、十分な中性子束が取り出せない状況にある。特に冷中性子源の効率は低い。それに引き換え、他の原子炉は最新の炉設計であることに加え、冷中性子源の効率の最大化が図られている。そのため、冷中性子ビーム強度においては約 1 桁の違いがある。これを是正すべく、2000 年代において、JAEA は冷中性子源で約 2 倍、中性子導管のスーパーミラー化⁺で約 5 倍の利得が得られる中性子ビーム 10 倍計画を立案した。しかし、その計画段階において、予算が削減され、さらには東日本大震災に見舞われたため、未だ達成していない。JRR-3 を世界有数の研究炉とするためには、まず、中性子束を取り出すための原子炉の最適化が必要であり、冷中性子源倍増計画を早急に進める必要がある。

② 中性子導管のスーパーミラー化

震災による JRR-3 長期停止の間を利用して、C1, C3 ライン (図 6 参照) において中性子導管のスーパーミラー化 (3Q) が行われた。この作業はほぼ終了しているが、まだ、C2 は手つかずの状態であり、さらに強度増強に重要な炉室内の中性子導管のミラーも 20 年前の通常ミラーのままである。また、T1, T2 は 2002 (平成 14) 年にスーパーミラー化 (2Q) されたが、今ではさらに性能の良いスーパーミラー (3Q) が実用化されている。早急に、これらを更新し、利用できる中性子ビーム束をさらに向上させる必要がある。特に炉室内の中性子導管のミラー化に関しては線量が下がっており更新の好機である。

③ 原子炉室およびビームホールに設置した装置の高度化

J-PARC MLF⁺ のパルス中性子源に比較して、JRR-3 の定常炉中性子源は、中性子束が大きいと、長波長中性子を用いた小角散乱によるナノオーダーの構造解析や磁気構造解析、さらには 3 軸分光器によるハードマターの励起等の研究に適した線源といえる。また、定常炉中性子源は偏極中性子を用いた緻密な研究にも適している。1990 年

代においては、JRR-3 で多くの先導的な研究が行われたが、2000 年代に入ると、韓国 HANARO⁺ (熱出力 30MW) の本格的稼働や、2005 年のオーストラリア ANSTO の OPAL 原子炉 (熱出力 20MW) の稼働と、これら施設に最新型の散乱実験装置が建設されたことにより、JRR-3 に設置された装置群は性能の面においても劣勢に立たされている。現在、

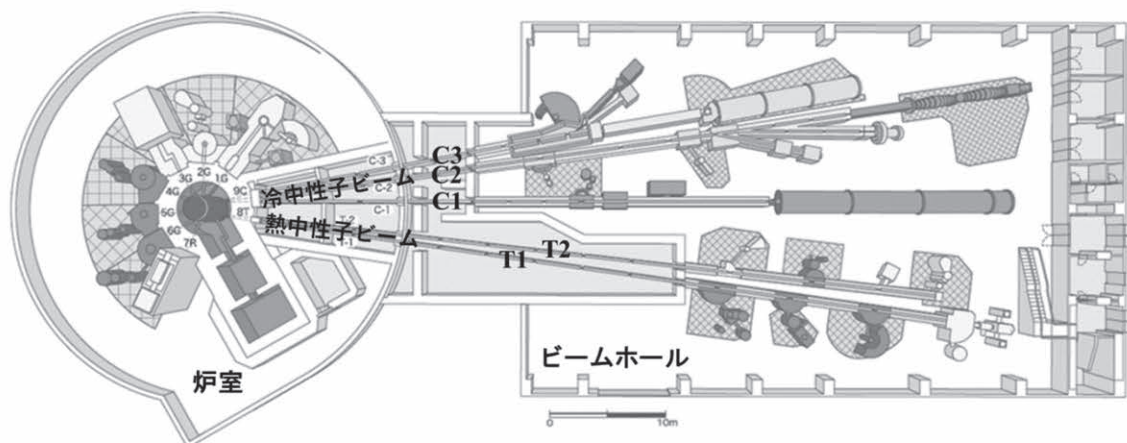


図6 JRR-3 の平面図

(出典) 日本原子力研究所「研究用原子炉 現状と役割」

装置群の高度化を進めているが、原子炉が長期停止中であることもあり、十分な進展は見られていない。装置群の高度化としては、

『3軸分光器群の偏極化』：偏極中性子ビームを利用した研究ができるようなオプション (入射側およびアナライザー側に偏極子オプションの導入)、またこれに関連して分光器の非磁性化が必要。

『進化型3軸分光器の建設』：現在、ある角度、あるエネルギーでの中性子強度を点データとして測定し、その角度スキャンおよびエネルギースキャンを行うことでデータを得ていたが、マルチアナライザと位置敏感型検出器を備えた進化型3軸分光器に置き換えることで、測定効率を劇的に向上させる。

『大強度 (材料・磁性) 回折装置』：定常炉冷中性子源から得られる長波長中性子を用いることで、低角度領域で大強度回折実験が可能になり、特に磁気構造解析に威力を発揮する。諸外国の定常炉中性子源では、パルス中性子源ではなかなか難しいこのような長波長大強度中性子回折装置の計画が進んでいる。今後の J-PARC-MLF との相補性を考えた場合に有効な装置である。

『小角散乱装置』：中性子ビーム施設には必ず小角散乱装置が1台もしくは複数配置され、ソフトマターをはじめとするさまざまな分野での研究に供されている。また、小角散乱装置は産業界からの利用要望も高い。現在、JRR-3 には SANS-U (大学所有) と SANS-J-II (JAEA 所有) の2台の小角散乱装置があるが、震災直前の状況を例にとっても、数多いユーザーの要望に十分に対応できているとはいえない。特に産業界からの利用には殆ど対応できていなかった。さらに、高圧セル、高温セル、引張試験機、レオメーター⁺、散乱・熱分析同時測定、偏極測定など、といった装置に付属するアクセサリを充実さ

せることで、中性子散乱による高度な物質構造解析、新物質・材料の開発、製品検査、等に大きく貢献することが期待される。

5 研究炉の運営

(1) 運営組織

① JAEA における共同利用施設の運営

我が国の熱出力 1MW 以上の研究炉は JAEA と京都大学複合原子力科学研究所が運営している。京都大学複合原子力科学研究所は原子炉に対する安全規制やセキュリティが厳しくなり、大学で研究炉を維持管理していくことが困難となるなか、燃料問題の困難さもあって、加速器を中性子源とした将来計画を検討している。この現状からすると研究炉の運営組織としては JAEA が最有力な候補である。一方、JAEA は高速増殖原型炉；もんじゅ（以下「もんじゅ」という。）の運営を行っていたが、もんじゅを巡っては平成 27 年 11 月に原子力規制委員会が半年を目途に、安全に運転できる新たな事業者を示すよう文部科学大臣に異例の勧告を出した[8]。文部科学省は勧告に対する回答期限を過ぎても新たな事業者を示せず、結局廃炉となっている。このような状況から、国民が JAEA の安全管理能力に不安を覚える懸念がある。ただし、液体金属ナトリウム冷却の高速増殖炉の原型炉であるもんじゅと主に軽水冷却の JRR-3 に代表される研究炉とはリスク要因が異なる。また、JRR-3 等に対する原子力規制委員会による新規制基準適合確認審査において、JAEA は研究炉の安全管理能力を有していることが示されている。

② 中性子散乱施設の運営

JAEA が現在運営している大型施設の現状を見てみると以下のことが見て取れる。大強度陽子加速器施設 J-PARC は KEK と JAEA の両者の共同運営で成果を挙げている。また、加速器施設の建設とその後の運営で、JAEA と KEK の多くの研究者が育成されている。JRR-3 の利用に係る運営面でも、東京大学原子力専攻、東京大学物性研究所と JAEA が協力することで大きな成果を挙げてきた。これらの状況は大型施設で大きな成果を挙げるには利用者の意見を大型施設の運営に反映させることが重要であることを意味し、大型施設の建設の場合は設計段階から利用者の意見を取り入れる組織体制が必要であることを示している。

照射炉の建設及びその後の運営に大学組織の関与が重要であるとするならば、これまで JMTR は JAEA と東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センターが協力して研究成果を出してきた。照射炉を建設・運営にあたり JAEA と量子エネルギー材料科学国際研究センターがこれまでに以上に緊密な連携を取って進めることが望まれる。量子エネルギー材料科学国際研究センターは中性子照射に関する学術利用に関しては、関連の研究者コミュニティとの連携を通じて広く研究分野をカバーすることができる一方で、今後の照射炉に強く求められる産業利用の促進のためには、産業界もより主体的に建設・運営に関わることが求められる。具体的にどのような方式で産学官連携を実現するかについては、今後、十分検討することが望まれる。

ビーム炉の次期炉を検討する場合、海外での研究炉の建設や運営で以下のことが参考

になる。

欧米で成功している中性子散乱施設は、例外なく中性子散乱研究者であるその施設の研究・経営陣が主体となって、研究の大きな方向性を考えながら研究炉、あるいは加速器、その中性子源などの仕様を決め、建設に関わり、運営している。中性子源・ガイドホールなどの将来計画、そこに設置すべき実験装置を決定し、予算要求するのもその研究・経営陣である。当然ながらその過程で中性子散乱コミュニティーの意見を取りまとめ、国際的アドバイスを受けながら計画を練り上げていく。

研究炉の炉心設計はそこに設置する冷中性子源、熱中性子源、高温中性子源、中性子飛行管、ガイド管などと密接に関わっていて、さらにそれらは最終的に設置する装置群の選択、最適化設計とも関り、その施設の将来の拡張計画に大きな影響を与える。どれ一つ取ってもその施設が目指す研究計画の将来像と無関係では有りえない。

このような意味で研究炉の設計を行うチームと中性子散乱研究に責任をもつチームとは相当に密接な関係を築かなければ総体として研究成果をあげられる施設を計画・設計・建設・運営することは難しい。一方、現状ではこれらの高度な判断を要求される技術的知識・経験を持った研究者の数は日本には著しく少ない。コミュニティーとしてそのような研究者を育てることの可能な研究組織を早急に立ち上げる必要がある。また、大学、研究所、民間、また海外との活発な人事交流が不可欠である。若い人材が供給され、内部の研究者が外部の大学・研究所などへ移動することでより活力のある研究コミュニティーができることになる。

さらにこのような運営をするためにはその研究・経営陣に予算及び人事に関する十分な権限が不可欠である。それ無しでは多額の予算を必要とする施設の建設、運営に関し責任を取れる組織がなくなり、研究・経営の判断はできてもそれを実行することができない組織となってしまふ。

(2) 共同利用体制

① JRR-3 の施設供用制度

JRR-3 を用いた利用は、表6のように研究開発と研究開発以外に大別され、このうち研究開発は、JAEA の供用実験装置を用いる一般枠（原子力機構の「施設供用制度」）と主に大学が所有する装置を用いる優先枠（東京大学原子力専攻共同利用管理本部（東京大学物性研究所を含む）の「大学共同利用制度」）に分類される。一般枠については、JAEA が定期募集（11月、5月）又は随時受付として課題を受付けている。優先枠及び研究開発以外の利用は定期的な課題公募はなく、随時受付により実施している。そのうち、大学が行う共同利用は、東京大学原子力専攻共同利用管理本部が窓口としてJAEA と契約を取り交わし実施している。

JAEA の施設利用については <http://tenkai.jaea.go.jp/facility/index.html> を参照されたい。

JRR-3 では、利用者の受付窓口、技術的相談、入構手続き、保安教育、実験支援などの対応を研究連携成果展開部、物質科学研究センター、研究炉加速器管理部が相互に

協力できる体制として一元的な窓口である JRR-3 ユーザーズオフィスを構築し、運営している。

表 6 JAEA の施設供用の利用区分

研究開 発	一 般 枠	成 果 公 開	一般課題（定期募集、随時受付（緊急時のみ））
			競争的資金利用課題（定期募集、随時受付）
		成 果 非 公 開	一般課題（定期募集、随時受付）
			産業利用促進課題（定期募集、随時受付）
	優先枠（大学の共同利用等）		
研究開発以外（RI 製造・シリコン半導体製造等）			

大学共同利用（全国共同利用）の利用区分

- ・一般課題 年一回公募
- ・IRT (Instrument and Research Team) 課題（装置担当者グループ課題）

各装置につき 1 課題

（出典）原子力安全に関する分科会で作成

② JRR-3 施設利用における課題と対応

日本学術会議で報告された提言「研究用原子炉のあり方について」[1]において、JAEA の「施設供用制度」と東京大学原子力専攻共同利用管理本部（東京大学物性研究所を含む）の「大学共同利用制度」が共存し、大学利用者から見た場合の 2 元的な利用窓口の複雑さや課題採択審査などで課題の重複の可能性などの非効率性に関するコメントがあった。このうち、利用窓口の問題については、JRR-3 ユーザーズオフィスと東京大学原子力専攻共同利用管理本部が同一建家内に配置され、相互の窓口間での情報交換が行い易くなったため、運転再開後の利用においては以前よりも改善されるものと思われる。また、中性子ビーム利用における課題採択においては、JAEA と東京大学物性研究所が共通の課題採択システムを用いることで、課題採択審査における課題の重複は避けられるようにしている。しかし、組織毎ではなく JRR-3 施設全体としての研究成果を最大限となるよう必要な見直しは適宜実施していくべきである。

③ JRR-3 施設全体としての研究成果最大化に向けた取り組み

JRR-3 の再稼働、原子炉設備保全や高経年化対策等を確実に実施し、年間 7 サイクル（26 日/サイクル）の安定運転を実施することを前提として、ホームページによるきめ細かい情報の提供、東京大学物性研究所等との利用受付窓口の連携強化、ユーザーフレンドリーな課題申請システムの採用などユーザーズオフィスの機能の拡充を行うとともに、コーディネータ、実験支援者の配置等により供用体制の充実を図る。研究環境の充実の取り組みとしては、JRR-3 の高度化を図る。また、利用者のすそ野拡大の取り組みとして、J-PARC やつくば学園都市など国内トップクラスの大学、研究機関と近接するという地の利を生かして、JRR-3 を中心とした利用者の裾野の拡大と異

分野・異種融合を促進し、新しい成果及び価値の共創の場を創出する。社会的にインパクトの高い成果創出にむけて JRR-3 に関与する研究者、研究機関の有するシーズと産業界のニーズとのマッチングを図る、などが望まれる。

④ 共同利用施設における利用体制に関する視点

我が国の共同利用施設（大学に附置される研究施設のうち、共同利用・共同研究拠点として文部科学大臣の認定を受けたもの）の全てに当てはまることではあるが、近年の継続的な運営費の削減により、どこも厳しい運営を強いられている現状がある。

利用者の旅費や実験に関わる消耗品等の経費は、文部科学省等の共同利用拠点に関連する外部資金を、施設側の努力で獲得することによって、その一部が賄われている。しかしながら、この状況は、施設側の業務の増大と、それに伴う研究開発時間の減少を引き起こし、「世界でその施設でしかできない先端の研究設備を利用者に提供する」という、本来、施設側の一番大切なミッションが滞り、世界的な競争力の低下につながるという悪循環を引き起こしている。

この悪循環を断ち切るには、必要な運営費が適切に配分されることが最も大切であるが、施設側も利用者から適切な利用料を徴収できる仕組みが必要である。国には、利用料の原資となるよう利用者が獲得できる補助金等の研究資金の設置が望まれる（米国では、研究炉やその付帯施設の利用に関してそのような仕組みが既に存在している）。これは、現在、施設側が獲得している共同利用拠点に関わる経費を、利用者が獲得することに対応する。これによって、利用者側の研究成果に対する責任とインセンティブが増大するとともに、施設側は自らの施設が利用者に選ばれるよう最高の利用環境を整えることに注力することになり、利用者にとっても大きなメリットとなるはずである。（J-PARC の MLF は中性子ビームを用いる実験施設であり、その共同利用の体制については〈参考資料 3〉を参照されたい。）

（3） 人材育成

研究炉を利用した人材育成は、各種の研究者の育成だけでなく、発電炉を運転する技術者の育成においても重要である。近年、新規に発電炉導入を計画しているアジア諸国においては、原子力技術者の育成が急務となっており、これに対応するため、産学官連携の原子力人材育成ネットワークが構築された。研究炉を利用した人材育成としては、文部科学省の平成 22 年度「国際原子力人材育成イニシアティブ」に係る公募事業として、国内の若手技術者、大学生・高専生等を対象に、JMTR を活用した総合的な研修講座が実施されていた。また、京都大学複合原子力科学研究所においても、学部学生・大学院生を対象とした実験教育が行われており、特に KUCA を用いた原子炉物理実験は全国大学の大学院生を対象として昭和 50 年から行われて大きな貢献をしてきた[1]。さらに、JMTR では、アジア諸国の原子力技術向上や人材育成を行うためのワールドネットワークの構築の一環として、平成 22 年度より海外若手研究者・技術者を招へいし、基礎的な実務研修を行っていた。

JMTR の廃炉の決定はこのような人材育成プログラムの廃止となり、これまで原子力分

野の人材育成に大きく貢献してきた京都大学複合原子力科学研究所の KUCA もいずれ廃炉となる時期が来る。つまり、現状で原子力分野の人材育成について明確な計画を検討する必要がある。

原子力委員会は平成 24 年に「原子力人材の確保・育成に関する取組の推進について」で以下のような見解を出している[9]。原子力発電所を保有する電気事業者にあつては、従事する人々が東電福島第一原子力発電所事故の教訓を血肉化することが必須であるが、同時に、原子力発電所の運転チームに安全技術者を配置するシフト安全技術者制度、運転員の資質の高い要求に対応するために学士の資格もしくはそれと同等の学術の素養を運転員に求める制度などを導入し、人材育成機能の在り方を見直し、一層充実させることを早急に検討すべきである、と提言している。

原子力発電所の運営母体組織である電力会社に就職する学生の 80%以上の理工系学生は大学あるいは大学院で原子力学を学んでいない電気、機械、建築、土木などの非原子力を専攻してきた学生である。これらの学生が入社後、短期間、原発従事者向けの座学中心の研修を受けているが、上述した原子力に関わる総合的な基礎学力を十分に習得しているとは言い難い。原発の通常のオペレーションとは異なる不測の事態に遭遇した時、あるいは事故時に現場にて緊急の判断を求められることを想定しなければならない。そのためには原子力に関する基礎学力および豊富な経験が要求される。それが短期間の研修で満たされるとは考え難い。つまり、各電力会社は大多数の非原子力専攻出身からの就職者に、原子炉の操作実習も含めた原子力教育を充実化させなければならない。そのための研究用・教育用原子炉の設置と社会人向けの原子力教育プログラムの制定、習得の認定制度の設置が早急に求められる。

さらに我が国において、将来、東京電力福島第一原子力発電所事故を起こした炉の廃炉、使用済燃料の処理・処分、通常の原子力発電所の廃炉など長期にわたる事業が必要とされる中で人材育成は重要で、研究炉が果たす役割は大きい。

6 まとめ

我が国における研究炉の在り方を検討した結果、以下のようにまとめられる。

(1) 研究炉の安全性に関して、研究炉は、発電炉と比較して低出力であり、崩壊熱や炉内に蓄積された放射エネルギーもけた違いに小さく環境への影響も小さいなどの特徴がある。また、炉型が多種多様であることから、異常時の状況もさまざまであり、リスクの大きさも異なる。新規制基準では自然災害等への対応が強化されているが、グレーデッドアプローチを適切に適用するなど、合理的な安全規制が必要である。

(2) 多くの研究者の研究の場を与えてきた JRR-3、KUR、JMTR の中で JMTR の廃炉は原子力発電所の安全に係る研究の場を無くした。韓国や中国での原子力発電所の大きな事故が我が国へ大きな影響を及ぼす地理的条件からも、過酷事故を経験した我が国が安全研究を進めるために JMTR に代わる照射炉の建設は最重要課題である。

また、新たな研究炉ができるまでには長期間かかることから、照射炉のユーザーに対する支援が必要である。支援の内容としては、JRR-3 の照射設備の改善、海外研究炉の使用

などを検討することが望まれる。なお、海外研究炉の利用に関しては、8頁にあるように、「東北大学金属材料研究所では JMTR 停止以降、全国共同利用のための代替照射として海外炉を利用しているが、経費などの理由により JMTR 稼働時の 1/4 程度以下しか照射できていないのが現状である。」とされている。これをカバーするような支援が必要である。

(3) 研究炉の中で最も多くの研究者に研究の場を与えてきた JRR-3 が長期にわたり稼働できない状況が続き、世界の先端的研究から大きく後れを取る状況の中で、JRR-3 の高度化は重要な課題である。また、JRR-3 も高経年化が進みつつある。新たな研究炉の建設までには長期間かかることから、次期炉の検討を早急に進めるべきである。

(4) 大型共同利用施設では、建設の段階から運営の段階で利用者の意見を運営に反映させることが重要で、新たに建設する照射炉でこのような取り組みを取り入れることを実現すべきである。

(5) 将来、研究炉は産業利用や原子力発電所の安全性や廃炉に係る利用が増加すると考えられる。これに対応するために関係省庁は研究炉の建設や運営に必要な費用の適切な負担について検討する必要がある。

(6) 将来、東京電力福島第一原子力発電所事故を起こした炉の廃炉、使用済燃料の処理・処分、通常の原子力発電所の廃炉など長期にわたる事業が必要とされる中で人材育成は重要で、研究炉が果たす役割は大きい。

7 提言の内容

(1) 我が国の科学技術を支える量子ビームである放射光及び中性子を提供する施設の充実重要である。特に、JMTR の廃炉による我が国における照射炉の消滅および JRR-3 や KUR などのビーム炉の高経年化は大きな懸念材料であり、早急な改善が必要である。

(2) 現状で最も重要なことは、照射炉の建設を早急に進めることである。出力は JMTR と同程度 (40~50MWth) とし、照射した試料を扱う実験施設を備える必要がある。研究炉の建設には長期間かかることから、この間のユーザーへの支援を行う必要がある。

(3) 中性子ビームの利用を促進するために、JRR-3 の早期の再稼働を進め、冷中性子源の増強と中性子導管のスーパーミラー⁺化等の高度化を図ることが必要である。また、長期的な観点から時間を要する JRR-3 の次期炉の検討を早急に進めるべきである。

(4) 研究炉の利用では産業利用および原子力発電所の安全性の研究開発の占める割合が大きくなると予想される。研究炉の建設や運営に対する費用について、関係省庁で適切な負担の在り方を検討する必要がある。また、将来の原子力発電所の廃炉や使用済燃料の処理処分等長期にわたる事業を支えるための人材育成が必要であり、研究炉は人材育成に大きく貢献できる

<参考文献>

- [1] 日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会、提言「研究用原子炉の在り方について」、2013年10月16日
- [2] 長期エネルギー需給見通し、平成27年7月、経済産業省
- [3] 照射炉の照射利用ニーズに関する調査報告書、JMTR 運営・利用委員会 照射炉利用ニーズ調査専門部会、2015年12月
- [4] Clément, B., Hanniet-Girault, N., Repetto, G., Jacquemain, D., Jones, V.M., Kissane, P., von der Hardt, P., “LWR severe accident simulation: synthesis of the results and interpretation of the first Phébus FP experiment FPT0”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 226 (1), Nov. 2003, pp. 5-82
- [5] 日本原子力学会「水化学」部会：「核分裂生成物挙動」研究専門委員会準備会編：Phébus FP プロジェクトにおける核分裂生成物挙動のまとめ - 福島プラント廃炉計画およびシビアアクシデント解析への適用、日本原子力学会、2017年5月
- [6] 日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会、記録「研究炉の長期停止に伴う影響調査」2017年8月28日
- [7] 次世代研究用原子炉検討特別委員会報告書、日本中性子科学会次世代研究用原子炉検討特別委員会、2012年12月
- [8] 原子力規制委員会 原規規発第 1511131 号、2015年11月13日
- [9] 原子力委員会、「原子力人材の確保・育成に関する取組の推進について（見解）」、2012年11月27日

<参考資料1>審議経過

平成 29 年

10 月 27 日 研究用原子炉の在り方検討準備会（第 1 回）
委員長、副委員長、幹事の選出
研究用原子炉のあり方について自由討議

11 月 24 日 研究用原子炉の在り方検討準備会（第 2 回）
研究用原子炉のあり方について自由討議

平成 30 年

1 月 17 日 研究用原子炉の在り方検討準備会（第 3 回）
提言「研究用原子炉の在り方について（案）」について審議

3 月 1 日 研究用原子炉の在り方検討拡大準備会（第 1 回）
提言「我が国の研究用原子炉のあり方について（案）」について審議

平成 30 年

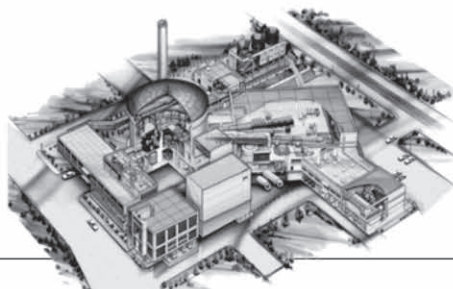
3 月 23 日～27 日 総合工学委員会 原子力安全に関する分科会(第 2 回・メール審議)
にて提言「研究用原子炉の在り方について」承認

6 月 28 日 日本学術会議幹事会（第 265 回）
提言「研究と産業に不可欠な中性子の供給と研究用原子炉の在り方」に
ついて審議、承認

<参考資料2> 研究炉の安全性の特徴

1. 研究炉の安全上の特徴 (JRR-3 の例)

研究炉は、発電炉に比べて低出力であり、崩壊熱や炉内に蓄積される放射エネルギーもけた違いに小さい。また、多量の冷却材を保有するプール内に設置されるため、全電源喪失の場合でも自然対流で冷却され、燃料の損傷には至りにくい。



JRR-3に関する安全上の特徴は以下のとおりである。

- 冷却材は常温、常圧。
- 安全保護系は”1 out of 2”ロジック、フェールセーフを採用。(⇒高い信頼性)
- 原子炉の異常時には、安全保護回路が作動し、制御棒は自動的に挿入される。この後は、特段の操作は不要。(⇒電源は不要)
- 運転中に全電源を喪失した場合にも、炉心からの崩壊熱は自然循環により除去できる実力を有している。(全電源を喪失したとしても炉心が損傷することはない。)
- 使用済燃料は自然循環により冷却される。
- 施設内の放射線量が低いため、事故時等に現場での対応が必要な場合にも、アクセス性が良い。
- 実験等の利用者に対して、異常時には、避難等の指示を行う。

2. 発電炉と研究炉の新規制基準の比較

発電炉		出力の高い研究炉 (JMTR、JRR-3、KUR)		出力の低い研究炉 (KUCA)
重大事故	意図的な航空機衝突			
	放射性物質の拡散抑制対策			
	格納容器破損防止対策			
	炉心損傷防災対策			
自然災害に対する考慮 (火山、竜巻、森林火災など)		自然災害に対する考慮 (火山、竜巻、森林火災など)		自然災害に対する考慮 (火山、竜巻、森林火災など)
火災に対する考慮		火災に対する考慮		火災に対する考慮
内部溢水に対する考慮		内部溢水に対する考慮		内部溢水に対する考慮
電源の信頼性		電源の信頼性		電源の信頼性
その他の設備の性能		その他の設備の性能		その他の設備の性能
耐震・耐津波性能 (耐震重要度分類Sクラスの設備・機器は、基準地震動及び基準津波の策定が必要)		耐震・耐津波性能 (耐震重要度分類Sクラスの設備・機器は、基準地震動及び基準津波の策定が必要)		耐震・耐津波性能
防災関係:		(JMTR、JRR-3)	(KUR)	(KUCA)
PAZ:5km LPZ:30km		PAZ:なし LPZ:5km	PAZ:なし LPZ:500m	PAZ:なし LPZ:なし

PAZ:急速な事故の進展を想定し、予防的に避難等を実施する区域
LPZ:急速に進展する事故の可能性等を踏まえ、避難や屋内退避等を準備する区域

<参考資料3> 照射炉の利用ニーズ

「照射炉の照射利用ニーズに関する調査報告書、平成 28 年 12 月、JMTR 運営・利用委員会 照射炉利用ニーズ調査専門部会」より

総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会及び原子力学会の特別委員会のもと、平成 27 年 6 月に「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」が取りまとめられ、我が国の軽水炉の安全性向上を効率的に実現する技術開発及び人材育成の将来に向けた道筋が示された。

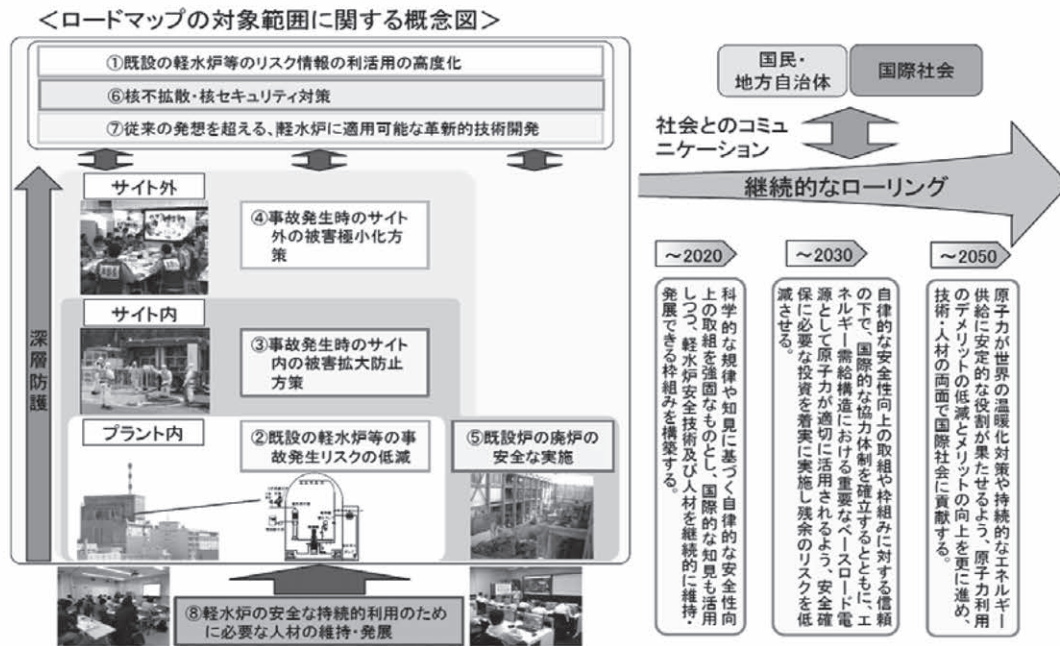


図1 軽水炉安全技術・人材ロードマップの必要性と役割

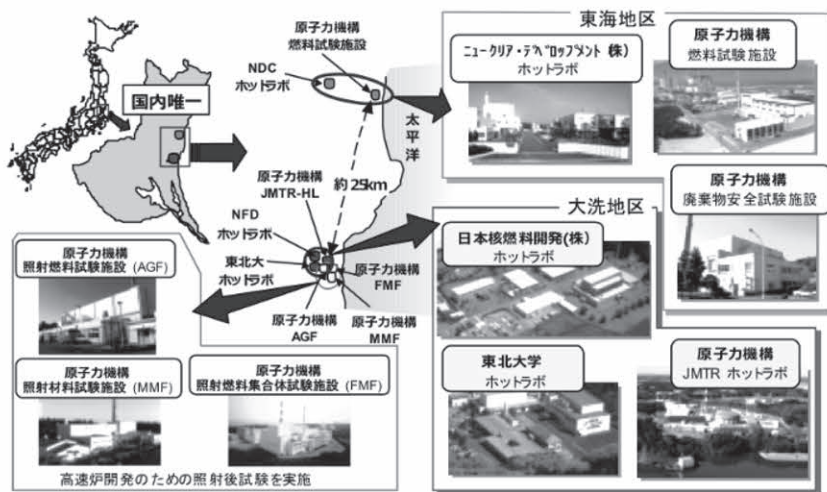


図2 大洗地区・東海地区に設置されている照射後試験施設群

原子力機構大洗研究開発センター近郊には、原子力機構の NSRR、常陽等の燃料・材料試験が可能な原子炉、各種の照射後試験施設、東北大学をはじめ、民間の照射後試験施設が隣接しており、このような施設群が比較的狭い範囲で密集している地域は、世界でもほとんど例がない。

医療用に限らず、全ての RI の内、中性子との核反応を利用して製造する RI について、「国内で開発した RI」、「利用度の高い RI」、「研究のために国産化が必要な RI」及び「国内安定供給のために国産化が急務とされている RI」の観点から調査を行った。これらの具体例を表 1 から表 4 に示す。

表 1 国内で開発した RI

核種	半減期	生産方法	用途・特記事項
^{192}Ir	73.83d	$^{191}\text{Ir}(n, \gamma) ^{192}\text{Ir}$	工業用(非破壊検査)、 $\phi 2.0 \times 2.0\text{mm}$ Ir ペレット、370GBq(10Ci)/個(使用時)
^{60}Co	5.269y	$^{59}\text{Co}(n, \gamma) ^{60}\text{Co}$	工業用(計測機器)、 $\phi 0.46 \times 10\text{mm}$ 及び $\phi 0.91 \times 15\text{mm}$ Co ニードル、37MBq(1mCi)、185MBq(5mCi)、370MBq(10mCi)、740MBq(20mCi)
^{169}Yb	32.0d	$^{168}\text{Yb}(n, \gamma) ^{169}\text{Yb}$	工業用(非破壊検査)、 $\phi 1.0 \times 2.0\text{mm}$ Y_2O_3 ペレット、370GBq(10Ci)/個(使用時)
^{198}Au	2.6937d	$^{197}\text{Au}(n, \gamma) ^{198}\text{Au}$	医療用(舌癌治療)、 $\phi 0.8 \times 2.5\text{mm}$ Au グレイン、185MBq(5mCi)/個

表 2 利用度の高い RI

核種	半減期	生産方法	用途・特記事項
^{60}Co	5.269y	$^{59}\text{Co}(n, \gamma) ^{60}\text{Co}$	工業用(滅菌用線源)、スラグ $\phi 6 \times 25\text{mm}$ またはディスク $\phi 7 \times 1.1\text{mm}$ (密封カプセル寸法: $\phi 11.1 \times 451.5\text{mm}$)、296~480TBq(8,000~13,000Ci)/本
^{192}Ir	73.83d	$^{191}\text{Ir}(n, \gamma) ^{192}\text{Ir}$	工業用(非破壊検査)、 $\phi 1 \times 0.5\text{mm}$ ウエハー $\times 2$ 枚、370~1,110Gq(10~30Ci)/個 医療用(小線源治療)370GBq{10Ci}/1 個
^{125}I	59.4d	$^{124}\text{Xe}(n, \gamma) ^{125}\text{Xe}$ $\beta \rightarrow ^{125}\text{I}$	医療用(前立腺がん治療)、 ^{124}Xe ガスループ又は密封照射、15MBq/個
^{89}Sr	50.53d	$^{88}\text{Sr}(n, \gamma) ^{89}\text{Sr}$	医療用(疼痛緩和薬)、酸化ストロンチウム(SrO)を照射、強 β : 1.495MeV(100%)

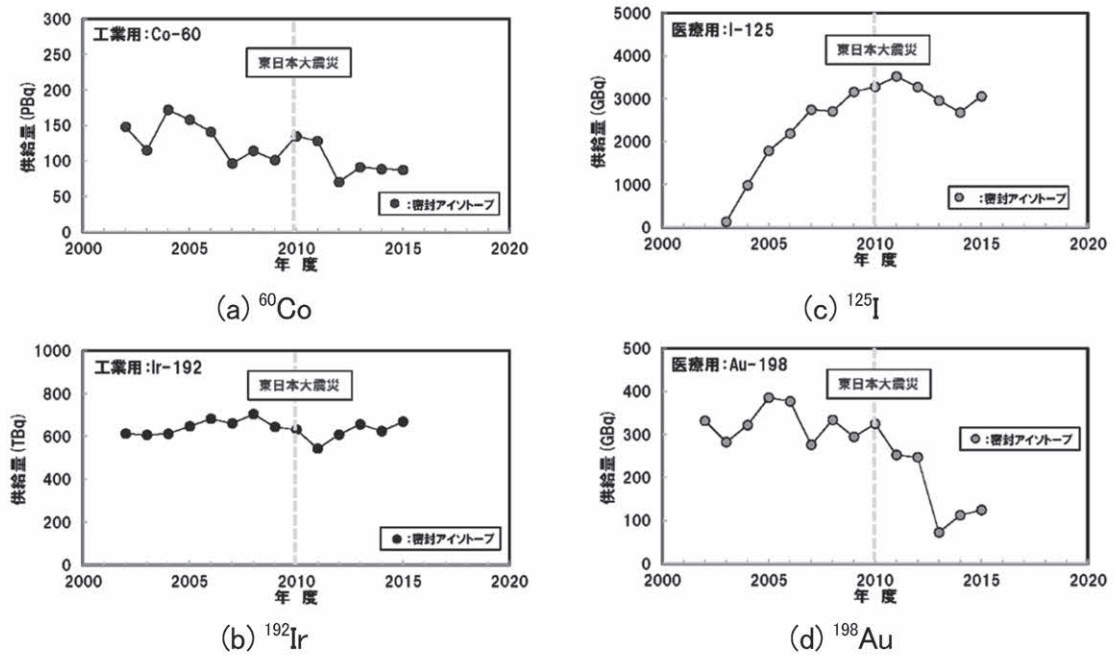
表 3 研究のために国産化が必要な RI

核種	半減期	生産方法	用途・特記事項
$^{188}\text{W}-^{188}\text{Re}$	69.4d/17h	$^{186}\text{W}(n, \gamma) ^{187}\text{W}$ $^{187}\text{W}(n, \gamma) ^{188}\text{W}$ $\beta \rightarrow ^{188}\text{Re}$	医療用(核医学診断・がん治療薬)、 ^{188}Re ジェネレータ、MAB 標識がん治療薬、強 β : 0.965MeV(25.6%), 2.12MeV(71.0%)、 WO_3 粉末を照射
^{186}Re	3.72d	$^{185}\text{Re}(n, \gamma) ^{186}\text{Re}$	医療用(核医学診断・がん治療薬)、MAB 標識がん治療薬 強 β : 0.939MeV(92.2%)、Re 金属粉末を照射
^{177}Lu	6.73d	$^{176}\text{Yb}(n, \gamma) ^{177}\text{Yb}$ $\beta \rightarrow ^{177}\text{Lu}$	医療用(がん治療薬)、MAB 標識がん治療薬 強 β : 0.497MeV(78.6%)、 Yb_2O_3 粉末を照射

表 4 国内安定供給のために国産化が急務とされている RI 製品

核種	半減期	生産方法	用途・特記事項
$^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$	66h/6h	$^{98}\text{Mo}(n, \gamma) ^{99}\text{Mo}$	医療用(核医学診断薬)、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータ原料、 MoO_3 ペレットを照射、 ^{99}Mo :37TBq(1000Ci)/週、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$:~11TBq(300Ci)/日

代表的な RI の供給量の推移を図3に示す。国内で開発した RI は、海外からの代替品の入手が困難であり、国内製造が不可欠なものとして開発されたものである。例えば、医療用の小線源として開発された Au-198 については、安定供給が困難な状況が続いている。



※: JRR-3 は平成 22 年 11 月まで稼働

図3 代表的な RI の供給量の推移

安定供給のために国産化が急務とされている RI としては Mo-99 があげられ、少なくとも国内需要量の一部でも国産化で確保しておくことが重要である。Mo-99/Tc-99m ジェネレータ医薬品の供給量と Tc-99m 注射剤の供給量を図4に示す。Mo-99/Tc-99m は、核医学診断薬として重要な核種である。

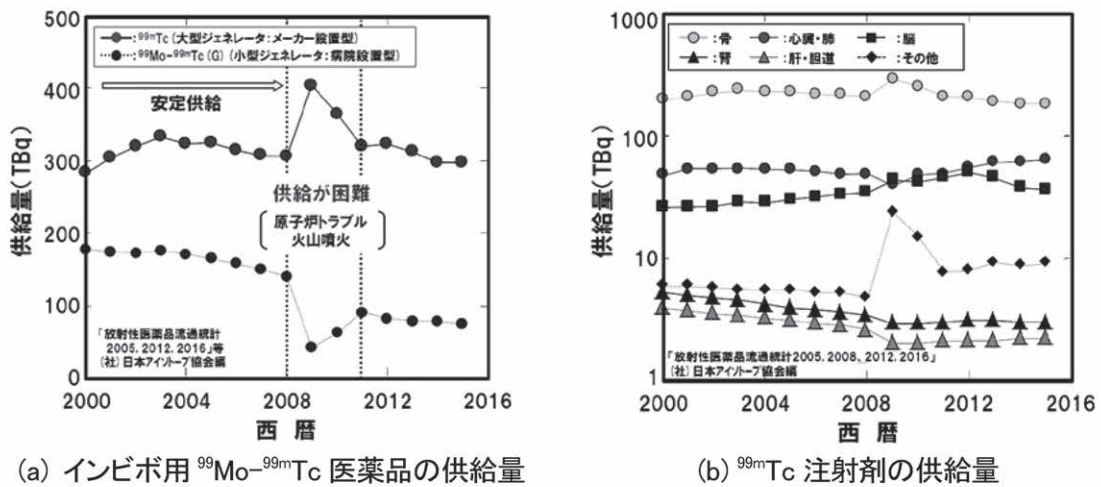


図4 インビボ用 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 医薬品の供給量と $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 注射剤の供給量

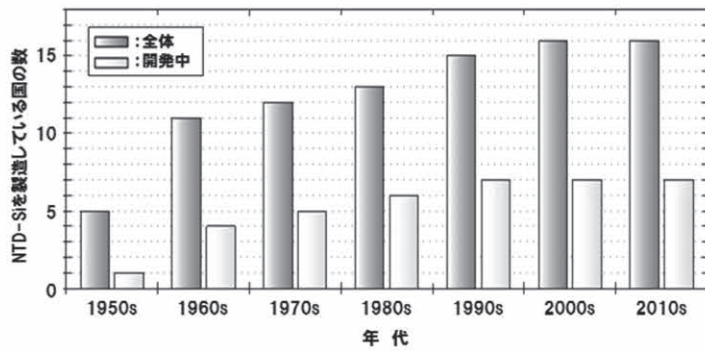
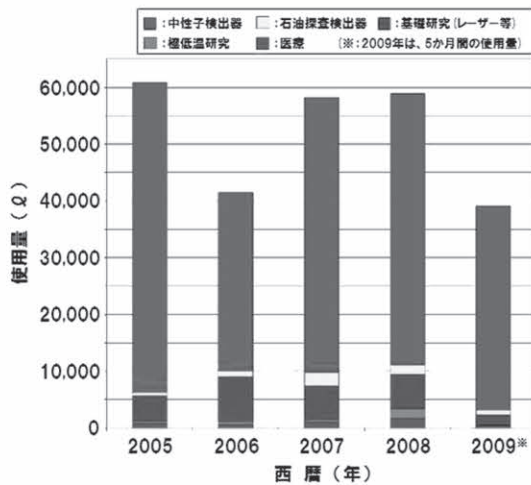


図5 NTD法によりSi半導体を製造している国の数

シリコンの照射は、1950年代から開始され、2010年代には16ヶ国の試験研究炉で製造されている。製造開発をしている国も7ヶ国あり、製造施設は増加傾向にあるが、日本のJRR-4やフランスのOSIRIS等の試験研究炉は廃炉となっており、製造施設を確保することも今後の課題となっている。



(a) ³Heの使用内訳 (2005~2009年)



(b) 中性子検出器の配備例

He-3は、中性子検出器、石油探査用検出器、基礎研究、極低温研究、医療分野等で利用されている。平成13年の同時多発テロ事件以降、米政府が各空港等にHe-3を使った中性子検出器を大量に配備し始めたこと、米国内に大量の³Heを必要とする新たな中性子散乱実験施設の建設が計画されたこと等から、平成20年を境に受給バランスが大きく崩れ、He-3不足と価格高騰という深刻な問題が起きた。

図6 ³Heの使用内訳とテロ対策用中性子検出器の配備例

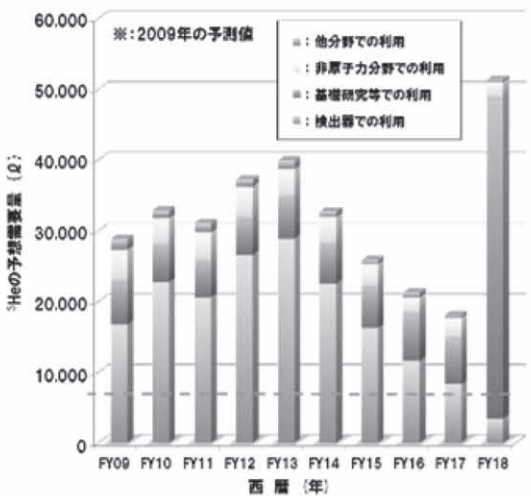


図7 ³Heの予想需要量

平成21年に予想されたHe-3の予想需要量(10年間)を図7示す。中性子検出器の配備はほぼ完了し、その需要は減少傾向にあるものの、各国で新たな中性子散乱実験施設が整備され、基礎研究等で大量のHe-3が必要と予想されている。このため、前述のとおり、He-3は不足状態が続き、現在も入手が困難な状況である。

<参考資料4> JRR-3 と J-PARC における利用体制について

1. JRR-3 と J-PARC における課題審査体制の比較

JRR-3 と J-PARC の中性子ビーム利用課題の審査体制とマシンタイム割り当て決定体制との比較を図1に示す。利用者から見ると、J-PARC の受付窓口が J-PARC ユーザーズオフィスに一元化されているのに対し、JRR-3 の受付窓口が大学共同利用窓口と JRR-3 ユーザーズオフィスに分かれている。

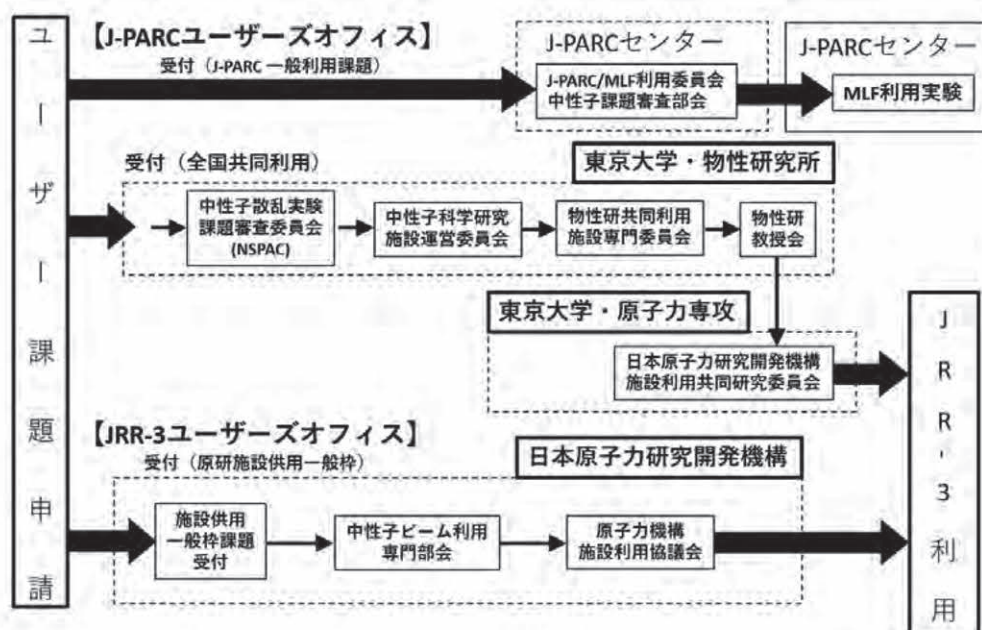


図1 JRR-3 と J-PARC における課題審査体制の比較（ビーム利用）

（東京大学物性研究所附属中性子科学研究施設運営委員会の配布資料に基づき作成）

2. J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) における体制

J-PARC/MLF の利用は表1のように一般利用、プロジェクト・装置利用、第三者占有利用の区分に大別されている。一般利用区分は、国内外を問わず幅広い利用者に開放することを目的に一般公募される区分である。プロジェクト・装置利用区分は、J-PARC 装置及び共用装置で、JAEA、KEK 及び登録機関が主導的に利用、あるいは大学等と共同で利用する区分である。また、第三者占有利用区分については、茨城県が専用装置として中性子実験装置を設置し、産業利用を目的とした実験課題の公募を行っている。

J-PARC の施設利用に係る利用者支援については、J-PARC ユーザーズオフィスを一元的な窓口とする体制を構築している。

J-PARC の施設利用については <https://j-parc.jp/> を参照されたい。

表1 J-PARC/MLFにおける利用区分

利用区分	課題の名称	対象装置	受付種類	利用種別
一般利用	一般課題（短期）	全装置	定期募集（2回／年）	成果公開型／ 成果非公開型
	一般課題（長期）	中性子装置	定期募集（1回／年）	成果公開型
	P型課題	ミュオン装置	定期募集（2回／年）	成果公開型
	新利用者支援課題	共用装置	定期募集（2回／年）	成果公開型
	緊急課題	全装置	随時	成果公開型／ 成果非公開型
プロジェクト・装置利用	プロジェクト課題	全装置	定期募集（1回／年）	成果公開型
	装置グループ課題	全装置	定期募集（1回／ 年）	成果公開型
	開発課題	共用装置	定期募集（1回／年）	成果公開型
第三者占有利用	産業利用課題	iBIX,iMATERIA	随時	成果公開型／ 成果占有型
	茨城県プロジェクト課題	iBIX,iMATERIA	2回／年, 1回／年	成果公開型

＜参考資料5＞研究炉の燃料問題

今後、研究炉を計画する場合には、新燃料及び使用済燃料に関して、次の問題について配慮する必要がある。

新燃料について

現在、研究炉に使用されている燃料は、主として濃縮度 20%未満の低濃縮ウラン・シリサイド燃料である。一方、海外ではウラン・シリサイド燃料に比べてウラン密度が高く、かつ再処理性に優れたウラン・モリブデン燃料の開発が進められている。まだ実用には至ってはいないが、将来的にはウラン・モリブデン燃料が研究炉の主たる燃料となることが予想される。

したがって、使用済燃料の処理処分の課題と合わせて、今後の開発状況を勘案しつつ、ウラン・シリサイド燃料及びウラン・モリブデン燃料の双方を候補として検討する必要がある。

使用済燃料について

現在、我が国で発生した研究炉の使用済燃料は、基本的に米国へ返還することで日米合意がなされている。しかし、その返還受け入れ期限は2029年5月であり、その後については現在のところ未定である。従って、それ以降の研究炉運転については、発生する使用済燃料の取り扱いを新たに決める必要があり、以下の3つの方法が可能性として考えられる。

① 米国返還期限延長

国内研究炉の使用済みの低濃縮ウラン燃料の返還は、米国の核不拡散政策の下、米国エネルギー省（DOE）が発表した外国研究炉使用済燃料受入プログラム（Foreign Research Reactor Nuclear Spent Fuel Acceptance Program）に基づく契約によるものである。これは、基本的に高濃縮ウラン燃料を低濃縮ウラン燃料に変更した研究炉からの使用済燃料が対象であり、米国による高濃縮ウラン燃料の返還促進のためのプログラムである。従って、高濃縮ウラン燃料返還後に低濃縮ウラン燃料を対象として本プログラムが延長されることは期待できない。

② 国内外での再処理

米国への返還期限が延長されても、将来的には使用済燃料の米国引き取りは終了するものと思われる。従って、米国返還以外の使用済燃料の処理処分体制を早々に構築することが必要である。

国内での再処理を考えた場合、発生する研究炉の使用済燃料の量が少ないため、技術的には可能であっても再処理の経費負担は割高になることから商業ベースに乗る可能性は低いと考えられる。また、国外に再処理を依頼する場合、再処理後に返還される高レベル廃棄物の保管が伴う点に注意が必要である。

③ 発生した状態のまま長期保管

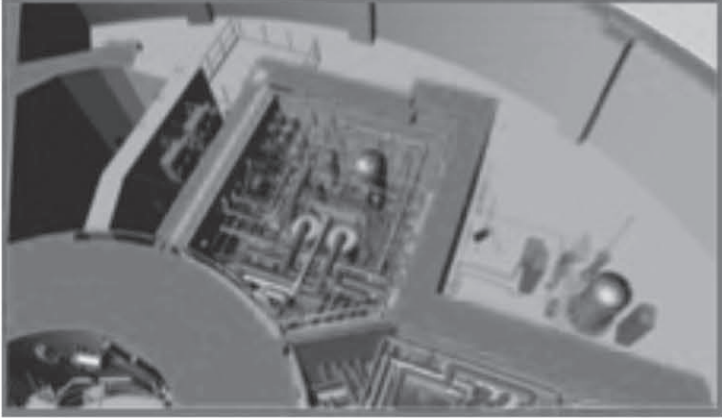
原子力発電所と比較して、研究炉から発生する使用済燃料の量は格段に少ないため再処理を行わずに長期にわたって保管管理を行うことも現実的な解決策となり得る。さらに、研究炉単独ではなく、原発の使用済燃料と統合して管理できる場合、より現実的な

案となり得るだろう。しかしながら、長期保管は使用済燃料の抜本的な解決策ではないことを鑑みると、現行の政策にある使用済燃料の再処理を前提としたものではなく、直接処分も含めた使用済燃料の最終処理処分について早々に見直す必要がある。

<参考資料6>用語集

ANSTO	Australian Nuclear Science and Technology Organization、オーストラリアの国立研究所
APS	Advanced Photon Source、米国の放射光施設
BNCT	Boron Neutron Capture Therapy、中性子捕捉療法
ESRF	European Synchrotron Radiation Facility、欧州の放射光施設
FRM-II	ドイツの研究炉
HANARO	High-Flux Advanced Neutron Application Reactor、韓国の研究炉
HFR	High Flux Reactor、フランスの研究炉
HFIR	High Flux Isotope Reactor、米国の研究炉
HTTR	High Temperature Engineering Test Reactor、高温工学試験研究炉
IASCC	Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking、照射誘起応力腐食割れ
ILL	Institute Laue-Langevin、フランス グルノーブルにある研究所
ISIS	英国の加速器中性子源
JAEA	Japan Atomic Energy Association、日本原子力研究開発機構
JMTR	Japan Materials Testing Reactor、JAEA が持つ材料試験炉
JOYO	高速実験炉「常陽」
J-PARC	Japan Proton Accelerator Research Complex、大強度陽子加速器施設
JRR-3	Japan Research reactor No. 3、JAEA が持つ研究炉
KEK	高エネルギー加速器研究機構
KUCA	Kyoto University Critical Assembly、京都大学臨界集合体実験装置
KUR	Kyoto University Research Reactor、京都大学研究用原子炉
MLF	J-PARC の Materials and Life Science Experimental Facility、物質・生命科学実験施設
NIST	National Institute of Standards and Technology、アメリカ国立の計量標準研究所
NSBR	米国度量衡基準局（現在の NIST）の原子炉
NSRR	Nuclear Safety Research Reactor、JAEA の原子炉安全研究炉
OPAL	Open Pool Australian Light-water reactor、オーストラリアの研究炉
RI	Radio Isotope、放射性同位元素あるいは放射性同位体
SNS	Spallation Neutron Source、米国の加速器中性子散乱施設
Spring-8	播磨科学公園都市にある大型放射光施設 Super Photon ring-8 GeV に由来している
インパイルループ	軽水炉内の水環境を模擬する条件で、炉室内に置く照射試験が可能な高温水循環. 供給装置

ウラン・シリサイド燃料	低濃縮燃料の代表的なもので、ウランにケイ素を混ぜた燃料
ウラン・モリブデン燃料	低濃縮燃料の一つで、ウランとモリブデンの合金燃料
可燃性毒物	燃料燃焼に伴う反応度低下を補償する物質。中性子を吸収し、中性子の吸収の少ない他の同位体に変化する。研究炉では主にカドミウムが用いられている。
グレーデッドアプローチ	原子炉のリスクに応じた合理的な規制を行うための手法。IAEA「基本的安全原則」での記載によると、「安全のために設置者によって投入されるリソースや、規制の対象範囲および厳格さとその適用は、放射線リスクの大きさとその制御可能性に見合ったものでなければならない。」とされている。
シリコンドーピング	原子炉内に設置したシリコン単結晶に中性子を照射すると、シリコン中に存在する Si-30 が中性子照射を受け Si-31 が生成され、これがベータ壊変して安定同位元素のリン (P-31) に変換する。シリコン中性子照射ドーピングはこの反応を利用して単結晶中にリンを均一に配置させる方法
深層防護	原子炉の安全対策を多重に講じること。第1～3層はプラントの当初の設計にかかわるもので、異常運転や故障の防止と制御、事故の制御を目的とする。第4層は、プラントの設計基準外の部分で、事故の進展や重大事故の影響緩和を目的とし、格納容器の防護などが含まれる。第5層は、放射性物質が大規模に放出された場合の影響の緩和が目的で、原発の敷地外も含めた緊急時の対応方法を定める必要があるとする。
スクラム	原子炉の緊急停止
スーパーミラー	中性子を効率よく導くために内側を特殊な膜で覆ったもので、ニッケル全反射のm倍という言い方で性能を表す。m=2を2Q、m=3を3Qという。
破壊靱性試験	切り欠きを有する試験片に単調増加荷重を与え、荷重と切り欠き開口変位等の関係から、亀裂が伝搬して破壊する際に示す材料の抵抗性を評価するための試験である。
ホットラボ	放射能の強い物質を安全に取り扱える 施設を有する実験室
娘核種	放射線壊変では壊変前の核種が α 線や β 線を放出して壊変後の核種に変わる。壊変前の核種を親核種といい、壊変後の核種を娘核種という。
もんじゅ廃炉	JAEAは高速増殖原型炉「もんじゅ」の運営を行っていたが、「もんじゅ」を巡っては平成27年11月に原子力規制委員会が半年を目途に、安全に運転できる新たな事業者を示すよう文部科学大臣に異例の勧告を出した。しかし、文部科学省は勧告に対する回答期限を過ぎても新たな事業者を示せず、結局廃炉となっている。
リグ	多重に計装を施した燃料集合体をひとまとめにし、それを収納容器中に入

	れて原子炉に装荷している。この多重計装燃料付きの収納容器を総称して、照射リグといい、測定リグ、多目的リグのように用いる。
ループキュービクル	 <p>遮蔽能力があり、各種のループ試験設備を設置するための設備</p>
レオメーター	材料の粘土を測定する装置

「放射化学」規定など

「放射化学」論文編集委員会規定

(名称)

第1条 この規定は、日本放射化学会（以下、本会という）会則第28条に基づき、日本放射化学会の和文誌「放射化学」の「放射化学」編集委員会を設置し、その運営に当たるために定める。

(編集委員会の構成)

第2条 編集委員会は、編集委員長1名、編集担当理事1名、並びに編集委員約5名で構成する。編集委員長は、前委員長の推薦により選任され、理事会の承認を得て、会長が任命する。編集委員は、編集委員長の推薦により選任され、理事会の承認を得て会長が委嘱する。

第3条 編集委員長および編集委員の任期は2年とし、重任を妨げない。

(編集委員会)

第4条 編集委員会は、次の事項について企画・審議し、「放射化学」の継続的な発行を行う。

- (1)「放射化学」誌の編集および発行に関すること
- (2)「放射化学」誌への投稿論文の審査に関すること
- (3)「放射化学」誌の編集委員長候補者及び編集委員候補者の推薦に関すること

(「放射化学」誌の発行)

第5条 本会が発行する「放射化学」誌は、1年に2回発行し、それぞれ異なる巻数を割り振る。

(論文の審査)

第6条 編集委員会は、「放射化学」へ投稿された論文に対して、担当編集委員1名を決定する。審査を要する記事については、担当編集委員は審査員1名を選出し、審査を依頼する。

第7条 論文審査の手続きは、別に定める審査内規による。

第8条 本規定の改定は理事会の決議による。

付則 この規定は、2013年1月1日から施行する。

「放射化学」発行規定

(目的)

第1条 日本放射化学会和文誌「放射化学」は、日本放射化学会（以下、本会）の目的を達成するために、(i) 放射化学並びにその関連領域における重要な進歩を含む学術論文と (ii) 会員および関連分野の研究者にとって有益な最新トピックスをまとめた記事を掲載する。

(「放射化学ニュース」との関係)

第2条

「放射化学」は「放射化学ニュース」(2012年まで発行、第26号が最終号)の後継誌であり、創刊年は2013年、巻数は第27巻からの発行とする。

(掲載記事)

第3条 「放射化学」は審査付き論文とそれ以外の放射化学関連分野の最新トピックスを掲載する。前者には、原著論文、総説論文、短報の各欄を設け、後者はこれまでの「放射化学ニュース」を引き継ぎ、

様々な記事を積極的に掲載する。

1. 審査付き論文

1-1. 原著論文は、新規な内容にもとづき論理的に明瞭な結論を含む学術論文をいう。

1-2. 総説論文は、当該分野のこれまでの研究の進展を専門的な立場から解説する学術論文とする。

1-3. 短報は、重要な研究成果を含んだ短い学術論文で、編集委員会は特に迅速な公表を行う。(未完でも学術的価値が高い学術論文を含む。)

1-4. この他に、編集委員会が認めた場合、上記以外の学術情報を掲載することがある。

2. 審査付き論文以外の記事

上記審査付き論文以外は固定した枠にとられない内容とし、主に各種特集記事、解説、トピックス、学位論文要録、施設だより、学会だより、研究集会だより(国内・国外)、情報プラザなどを掲載する。

3. 審査付き論文(第3条第1項)の投稿規則を第4条以降に定めるが、審査付き論文以外の記事(第3条第2項)に関する投稿規則は特に定めず、編集委員会の編集方式に従う。また本会の英文の論文誌 *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences* の発行規則は別に定める。

「放射化学」論文投稿規則

(投稿論文と依頼論文)

第4条 論文は投稿によるものと編集委員会からの依頼によるものとする。

(著者)

第5条 著者は本会会員であることを要しない。

(原稿の作成)

第6条 使用言語は日本語とする。

第7条 投稿論文の作成は、別に定める「放射化学」投稿の手引き(以下、「投稿の手引き」)に従うものとする。

第8条 原著論文、総説論文、短報以外の記事については、第6条、第7条に依らない形で原稿を作成できる。

(論文の受け付け)

第9条 原稿が、「投稿の手引き」に定める「投稿先」に到着した日付けをもって、論文の受付日とする。

(審査)

第10条 編集委員会は、査読者を委嘱して論文の掲載に関する意見を求め、掲載の可否に関する審査を行う。掲載可となった日付をもって受理日とする。投稿によるものと依頼によるものに関わらず、編集委員以外の査読者の意見を参考として、編集委員会が掲載の可否を決定する。

(論文の掲載)

第11条 掲載可となった論文は、速やかに論文誌上および論文誌 web サイトに掲載する。

(掲載料、別刷り)

第12条 論文および各種記事の掲載料は徴収しない。別刷りを作成する場合には実費を著者負担とする。

(原稿料)

(著作権)

第13条 論文誌に掲載された全ての論文等の著作権は本会に帰属する。原著論文、総説論文、短報については、著者は論文受理後速やかに「著作権譲渡同意書」を本会に提出しなければならない。

(本規則の改定)

第14条 本規則の改定には理事会の決定を要する。

付則 この規則は、2015年10月1日から施行する。

「放射化学」論文投稿の手引き

1. はじめに

この「投稿の手引き」は日本放射化学会（以下、本会）和文誌「放射化学」論文投稿規定に基づき、編集委員会にて原稿の作成の指針として制定されたものである。

2. 投稿に際しての注意事項

- 1) 採否が決定するまで同一趣旨の論文を他誌に投稿してはならない。
- 2) 他誌に投稿中の論文を投稿してはならない。
- 3) 投稿後の著者に関する変更は認めない。
- 4) 図版を転載する場合は、著者にて転載許可を著作権者より得ること。
- 5) 投稿原稿は以下の「3. 原稿作成時の注意事項」に従って作成し、その電子ファイル（PDF ファイル、MS-Word ファイルなどが望ましい）を編集委員会に電子メールにより送付する。到着次第、編集委員長より受付日が記載された受け取りの電子メールが送付される。

3. 原稿作成時の注意事項

- 1) (原稿の構成) 原稿は以下の順でそれぞれ改ページして編成する。(1) 表紙（論文題名、著者名、研究の行われた機関、同所在地などを記す）、(2) 要旨およびキーワード（5つ程度）、(3) 本文、(4) 引用文献、(5) 表、(6) 図、(7) 図の説明文。
- 2) (原稿の形式) A4 用紙を縦方向として、横書きに印字し、1 ページに 25 行程度とする。
- 3) (原稿の長さ) 短報以外は制限を設けない。短報は図表を含めて刷り上り 4 ページ以内を原則とする。なお刷り上がり 1 ページは約 2000 字であり、図・表は 1 枚につき 500 字とカウントする。
- 4) (要旨) 要旨として英文要旨（250 語以内）および和文要旨（400 字以内）の両方をつけること。
- 5) (引用の形式) 番号順とする。最初に引用された箇所の順で引用文献を並べる。引用文献の記載方法はアメリカ化学会発行の雑誌と同形式とする。なお本形式は本会の *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences* 誌と同様である。
- 6) (表) 表は説明も含めて英文で作成する。本文中では **Table** として引用する。
- 7) (図) 図は説明も含めて英文で作成する。本文中では **Fig.** として引用する。なお投稿時のファイルサイズは 10 Mbyte を超えないこと。
- 8) (その他) 図表などの数値や軸の表記では物理量 / 単位の形式をとることとし、物理量（単位）の表記は用いない。(例: **Time/min** とし、**Time (min)** は用いない。)
- 9) (カラーの図表) カラーの図表を掲載する場合には、原則として実費を著者負担とする。なお、論文誌 web サイト公開用の PDF 版については無料でカラーとすることができる。
- 10) (注意事項) 上記に著しく逸脱した原稿については、受け付けずに返却することがある。

4. 校正および論文誌発行後の正誤訂正

- 1) 著者校正は 1 回行う。返送期日に著しく遅れた場合には編集委員会の校正のみで校了とする。
- 2) 発行後 6 ヶ月以内に著者から訂正の申し出があった場合には、正誤訂正に関する記事を掲載することがある。

5. 投稿先

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方 2-4

日本原子力研究開発機構 安全研究センター 宮本ユタカ 編集委員長

Fax: 029-284-3665

e-mail: houshakagaku@radiochem.org

学位論文要録執筆候補者の推薦について

「学位論文要録」欄では、最近2年間の範囲で博士の学位を授与された会員の方々の学位論文内容を抄録の形で掲載致しております。現代の放射化学およびその関連領域における進歩についての情報を読者の方々に提供することが主な目的であります。しかし、編集委員会が広範な領域で活躍されている執筆候補者につきまして、遺漏なく情報を得ることは困難であります。このため、会員の皆様に同欄の執筆候補者（学位取得者）を推薦いただきたく存じます。自薦・他薦は問いません。詳しくは編集委員会にご照会下さい。

☆☆☆

「会員の声」欄へのご寄稿のお願い

本誌では、学会や学会出版物に関する会員の皆様の意見を掲載するために、「会員の声」欄を設けております。1000字以内（形式自由）におまとめいただき、編集委員会または学会事務局にお送り下さい。掲載の可否につきましては当方にご一任下さい。

☆☆☆

会員の異動に伴う連絡のお願い

会員の移動に伴い、所属、連絡先等に変更が生じた場合には、以下のwebページを参照し、事務局（jnr@ac-square.co.jp）までご連絡下さい。

会員情報変更等の手続き：<http://www.radiochem.org/community/update.html>

放射化学

第38号

平成30年(2018年)9月10日発行

編集

日本放射化学会編集委員会

委員長：宮本ユタカ、委員：佐藤 渉、鈴木 達也、井上 睦夫、藤 暢輔、
阪間 稔

連絡先：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方2-4 日本原子力研究開発機構
安全研究センター

宮本ユタカ (e-mail: houshakagaku@radiochem.org)

発行

日本放射化学会

出版担当理事：佐藤 渉

Web: <http://www.radiochem.org/>

印刷

松枝印刷株式会社

〒303-0034 茨城県常総市水海道天満町 2438

本誌掲載記事の著作権は日本放射化学会に帰属します。

賛助会員

株式会社アトックス

クリアパルス株式会社

サンゴバン株式会社

株式会社千代田テクノ

仁木工芸株式会社東京支社放射線計測グループ

東京ニュークリア・サービス株式会社

東京パワーテクノロジー株式会社

長瀬ランダウア株式会社

株式会社日本環境調査研究所

株式会社日立製作所

富士電機株式会社

ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ株式会社

公益財団法人 原子力安全技術センター

新潟県放射線監視センター

公益社団法人 日本アイソトープ協会

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

公益財団法人 日本分析センター

公益財団法人 放射線影響協会

一般財団法人 放射線利用振興協会

関西電力株式会社

九州電力株式会社

中国電力株式会社

中部電力株式会社

東京電力ホールディングス株式会社

北海道電力株式会社

国内外の叡智をたずさえ、 原子力産業再生の最前線へ。

社会と産業を支えるクリーンエネルギー原子力。
アトックスは、その安全と安定した運転に欠かせないさまざまな
メンテナンス事業を展開しています。

原子力発電所、原子燃料サイクル施設、ラジオアイソトープ (RI) 事業所などを対象に
放射性汚染除去、産廃物処理、放射線管理施設の保守・補修業務をはじめ
質の高いトータルメンテナンスを提供しています。

アトックスはこれからも、人と地球を見つめ、
安全・清潔・便利さを追求し続けます。

人×技術でNext Stageへ



株式会社 アトックス

業務内容

■福島復興事業

- 放射線管理 ●環境修復 ●除染作業 ●滞留水処理
- 下水処理 ●廃棄物処理

■原子力発電関連施設・原子燃料サイクル施設のトータルメンテナンス

- 放射線管理 ●放射性汚染除去 ●廃棄物処理 ●ランドリー
- 清掃・区域管理 ●設備/装置運転・点検保守 ●輸送
- 分析 ●各種工事

■RI使用施設関連業務及び医療事業関連業務

- 放射線管理 ●放射性汚染除去 ●廃棄物処理補助
- 管理区域内清掃 ●施設/設備運転・点検保守 ●加速器運転
- フィルター交換 ●デコミッショニング・設備工事
- 放射性薬剤取扱業務 ●同位体販売

- 本 社：〒108-0014 東京都港区芝4-11-3 芝フロントビル
TEL.(03)6758-9000 FAX.(03)3453-3821
- 事業開発部：〒108-0014 東京都港区芝4-11-3 芝フロントビル
TEL.(03)6758-9004 FAX.(03)3453-3821
- 技術開発センター：〒277-0861 千葉県柏市高田1201
TEL.(04)7145-3330 FAX.(04)7145-3649
- RI・医療事業部署：東海営業所 TEL.(029)282-1662
大洗営業所 TEL.(029)266-1331
東京営業所 TEL.(04)7141-1321
大阪営業所 TEL.(06)6384-6730
玄海営業所 TEL.(0955)52-3241

URL: <http://www.atox.co.jp/> (本社) <http://www.atox-isotope.jp/> (同位体販売)

クリアパルス (株) が提供する主要製品

自社開発のハイブリッドICを用いた低雑音プリアンプ
低雑音スペクトロスコピーアンプファイア

高性能パルスハイトアナライザ

多チャンネルプリアンプ、多チャンネルアンプファイア、多入力PHA

CdTe検出器プローブ、CsI(Tl)検出器プローブ、NaI(Tl)検出器プローブ、プラスチック検出器プローブ

電離箱、環境モニタ、高圧バイアス電源、NIMピン電源、ミニピン電源

電流電圧変換器、マルチワイヤビーム位置モニタ回路

加速器制御機器、信号変換器、アナログ/デジタル制御器

データ計測・収集・転送システム

その他物理計測器、特注機器



580型プリアンプ



8868A型IVC



8630型ハンドボーン



4066型アンプ



1216型PHA



6671型バイアス電源



E6660ミニピン電源



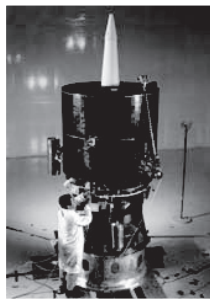
80110型プリアンプ



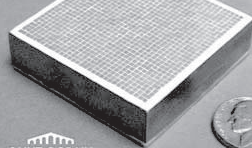
80112型MPX



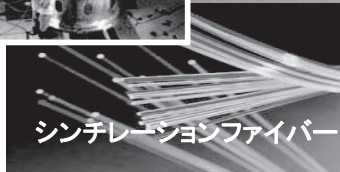
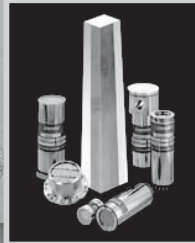
LYSO、LaCl₃、LaBr₃、NaI、CsI、BGO、CdWO₄、ZnS、YAG ...
 プラスチック、ファイバー、液体シンチレータ、アレイ状シンチレータ、
 ライトガイド、GM管、比例計数管、³He検出器等
 サンゴバンは、素材からプローブ・特殊用途まで、
 グローバル・スタンダードな最高品質のシンチレータを提供いたします。



イメージング用アレイ



SAINT-GOBAIN
CRYSTALS



シンチレーションファイバー



プラスチックシンチレータ



サンゴバン株式会社

〒102-0083 東京都千代田区麴町 3-7

Tel 03-3263-0559 Fax 03-5212-2196

URL <http://www.detectors.saint-gobain.com/>

お問合せ yasuo.watanabe@saint-gobain.com

(担当 渡辺)

放射線の
 安全利用技術を基礎に
 人と地球の
 “安心”を創造する。



CHIYODA TECHNOL CORPORATION

株式会社 千代田テクノル

URL: <http://www.c-technol.co.jp>
 e-mail: ctc-master@c-technol.co.jp

**TNSは
エネルギーエンジニアリングの
あらゆるステージで
あなたをサポートします。**



TNSは原子力・アイソトープに関する高度な知識と技術を駆使し、設計から施設の廃止にいたるまでのあらゆる段階でサポート業務を展開するとともに、先端技術分野における研究・開発においても、質の高いサポートを提供いたします。

安全設計・評価

- 施設設計
- 遮蔽設計
- 安全評価
- RI施設の申請業務代行

施設の管理・運営

- 大規模施設の運用管理
- 放射線管理

研究及び技術開発サポート

- 研究サポート
- 技術開発サポート

受託試験研究

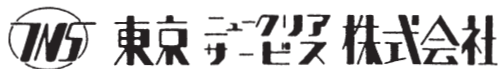
- 環境物質の分析
- 環境物質の挙動解析
- トレーサ試験
- 解体廃棄物の物理特性試験

工事

- 施設の保守・点検
- 施設の解体工事
- 施設の改造工事

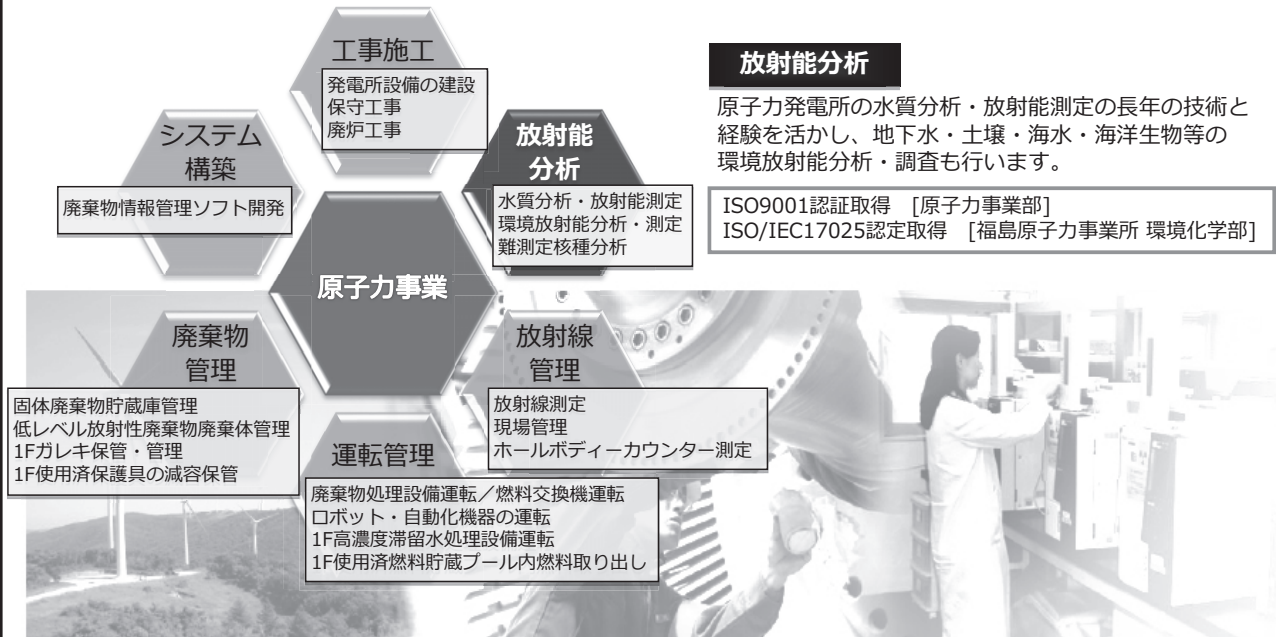
機器販売

- 放射線管理区域の空調機器の販売
- 放射線管理区域用機器の製造・販売



東京本社：東京都台東区台東 1-3-5 (反町ビル7F) 〒110-0016 TEL.03 (3831) 7957
 東海営業所：茨城県那珂郡東海村村松字平原 3129-31 〒319-1112 TEL.029 (282) 3114
 つくば開発センター：茨城県つくば市緑ヶ原 4-19-2 〒300-2646 TEL.029 (847) 5521
 大阪事業所：大阪市中央区内本町 1-2-5 (YSKビル5F) 〒540-0026 TEL.06 (4792) 3111
 六ヶ所事業所：青森県上北郡六ヶ所村大字尾駮字野附 1-4 〒039-3212 TEL.0175 (71) 0710

私たちは、エネルギービジネスにおける『豊富な経験と実績』に基づいた『コアテクノロジー』を駆使し、『様々なフィールド』でお客様をフルサポートいたします。



放射能分析

原子力発電所の水質分析・放射能測定の長年の技術と経験を活かし、地下水・土壌・海水・海洋生物等の環境放射能分析・調査も行います。

ISO9001認証取得 [原子力事業部]
 ISO/IEC17025認定取得 [福島原子力事業所 環境化学部]



原子力事業部
 〒135-0061 東京都江東区豊洲5-5-13 豊洲アーバンポイント
 TEL 03-6372-7165 FAX 03-6372-4161
<http://www.tokyo-pt.co.jp/>

Luminess

豊富なデザイン&高品質サービス

ルミネスバツツサービス

個人被ばく線量測定



本社/〒300-2686 茨城県つくば市諏訪C22街区1
大阪営業所/〒550-8668 大阪市西区新町1-1-17
ホームページアドレス/http://www.nagase-handauer.co.jp/

長瀬ワンダワア株式会社

ラジオアイソトープ(RI)取扱施設

RADIOISOTOPE(RI) HANDLING FACILITY

加速器取扱施設

ACCELERATOR HANDLING FACILITY

原子力施設

NUCLEAR POWER FACILITY

放射線モニタリング
施設の総合管理
施設・設備の設計・監理
放射能分析・測定
管理区域解除工事
コンサルタント業務
PET被験者管理システム

放射線管理
除染工事
放射能分析測定
原子力・核燃施設 D&D技術開発・事前調査・工事
コンサルタント業務

特殊施設管理技術の研究開発
放射線防護用品と機器の開発
除染関連技術の研究開発
研究・開発・調査業務の受託

ALARA

As Low As Reasonably Achievable

技術開発・研究

TECHNOLOGY STUDY AND DEVELOPMENT

JAPAN ENVIRONMENT RESEARCH CO., LTD.

株式会社 日本環境調査研究所

ホームページ <http://www.jer.co.jp/>

本社：〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6 丁目 24-1
技術開発研究所：〒342-0008 埼玉県吉川市旭 8 番 3
青森営業所：Tel.0175-75-2130 東京営業所：Tel.048-991-9461
仙台営業所：Tel.022-715-6081 静岡営業所：Tel.0537-86-7176
柏崎営業所：Tel.0257-21-4868 掛川オフィス：Tel.0537-28-8181
福島営業所：Tel.0244-26-5245 名古屋営業所：Tel.052-588-5875
茨城営業所：Tel.029-860-5073 大阪営業所：Tel.06-4963-2500

Tel.03-5322-2271 Fax.03-5322-2272
Tel.048-991-9461 Fax.048-991-9460

作業環境測定機関11-4(放射性物質) ISO9001:2008認証

非密封放射性同位元素取扱施設(技術開発研究所)

管工事業/建具工事業/とび・土木工事業/機械器具設置工事業

一般労働者派遣事業 高度管理医療機器等販売業・賃貸業

富士電機の放射線測定器



より正確に より簡単に

富士電機では、放射線管理システムをはじめ、放射線管理における様々な用途に応じた測定器類を取り揃えています。

〔取扱製品〕

- 放射線モニタリングシステム
- R I 排水管理システム
- 出入管理システム
- 非密封 R I 管理システム
- 従事者管理システム

-
- 各種サーベイメータ
 - 個人線量計／環境線量計
 - モニタリングポスト
 - ホールボディカウンタ
 - 体表面モニタ
 - 食品放射能測定システム
 - その他



富士電機株式会社 放射線システム部
 東京都日野市富士町1番地 〒191-8502 TEL 042-585-6024
<http://www.fujielectric.co.jp/> mail fric-info@fujielectric.co.jp

営業所
 北海道 TEL 011-221-5482 東北 TEL 022-716-0203
 東京 TEL 042-585-6024 中部 TEL 052-746-1032
 関西 TEL 06-6455-3891 九州 TEL 092-262-7844



MIRION
TECHNOLOGIES

放射線安全 さらなる水準へ

放射化学のための測定システム



ゲルマニウム半導体検出器



InSpector1000™ : 可搬型
デジタルスペクトロサーベイメータ



PIPS 荷電粒子検出器



ISOCS™ :
ガンマ線分析システム



FASTSCAN™ :
ホールボディカウンタ

ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ株式会社
 URL : <http://www.canberra.com/jp/> E-mail : jp-sales@mirion.com

東京本社 03-5835-5402
 大阪営業所 06-4806-5662



公益財団法人 原子力安全技術センター

放射線障害防止法に基づく登録機関業務

登録検査機関

問い合わせ先: 03-3814-7301

使用施設、貯蔵施設、廃棄施設等の施設検査・定期検査及び定期確認

登録定期確認機関

登録運搬物確認機関

問い合わせ先: 03-3814-7483

承認容器による輸送の運搬物確認

登録運搬方法確認機関

承認された積載方法による輸送の運搬方法確認

登録認証機関

問い合わせ先: 03-3814-7301

放射性同位元素装備機器の設計認証



登録資格講習機関

問い合わせ先: 03-3814-7100

第1種、第2種及び第3種の放射線取扱主任者免状取得のための講習

登録試験機関

問い合わせ先: 03-3814-7480

第1種及び第2種の放射線取扱主任者試験

登録定期講習機関

問い合わせ先: 03-3814-5746

放射線取扱主任者の資質向上のための講習

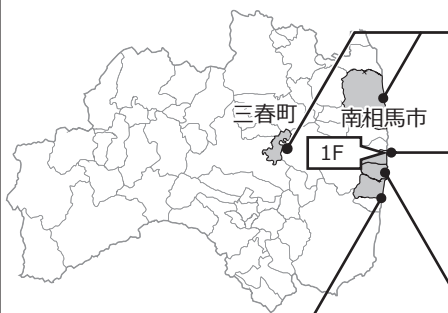
私たちは放射線障害防止法に基づく登録を受け、国に代わり、法令で定められた資格要件を備えた検査員、確認員、講師等によって業務を行っています。

〒112-8604

東京都文京区白山5丁目1番3-101号 東京富士会館ビル4階

ホームページ <http://www.nustec.or.jp/>

我が国唯一の原子力に関する総合的な研究機関として、東京電力HD 福島第一原子力発電所(1F)の廃止措置及び環境回復に取り組んでいます



福島環境安全センター

環境回復に向け、環境動態研究、放射線計測・分析技術等の技術開発を実施

大熊分析・研究センター※

(大熊町: 1F隣接地) 一部運用中

1Fのガレキ類、水処理二次廃棄物、燃料デブリ等の分析を行う施設を整備中

廃炉国際共同研究センター※

(富岡町)

世界の英知を結集すべく、国内外の大学、研究機関、産業界とネットワークを形成し、1F廃炉の研究開発と未来の廃炉研究を担う人材育成を一体的に推進

楢葉遠隔技術開発センター※

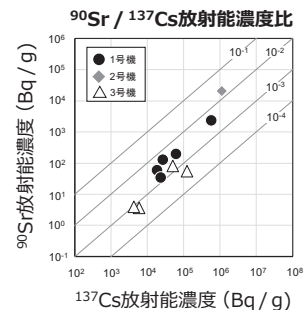
(楢葉町)

- ・遠隔操作ロボット等の開発実証(実規模及び小規模エリアの試験)
- ・VR等による作業員の訓練
- ・施設共用及び技術支援

※ 福島イノベーション・コースト構想の拠点(廃炉分野)

1F事故で発生したガレキの放射化学分析の事例

^{137}Cs と ^{90}Sr との放射能濃度の相関関係に基づき、測定が容易な ^{137}Cs から、直接放射能の測定が困難な ^{90}Sr の放射能濃度を推定することができる可能性が示されました



国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地1

TEL: 029-282-1122 (代表) URL: <https://www.jaea.go.jp/>



私たちは、環境放射能・放射線に関する分析専門機関です

分析の 質の保証 **世界トップクラス**

環境と安全に対する国民の認識が高まる現在、日本分析センターは、環境放射能・放射線に関する分析専門機関として、国民に信頼される環境放射能データの提供に努めています。

IAEAなど国際的な相互比較分析プログラムに参加して分析技術の客観的な評価を受けるとともに、国際標準化機構 (ISO) の認証・認定の取得やJCSS校正事業者 (区分: 放射線・放射能・中性子) として登録しています。

身の回りの環境に含まれるセシウム137、ストロンチウム90、トリチウム、プルトニウムなどの人工放射性核種からウラン、トリウムなどの自然放射性核種まで、様々な放射性核種の分析に対応します。また、安定同位体比分析にも対応します。

確かな 精度管理 **安全と信頼性**

日本分析センターは、分析結果の信頼性を確保するために、IAEAなどの国際機関が主催する環境放射能分析の国際相互比較分析プロジェクトに参加しています。優れた成績を修めるほか、様々な認証・認定を取得しています。

価値ある 実務研修 **技術者に学ぶ**

日本分析センターは、都道府県、その他各方面からの要請に応じ、環境放射能分析・測定技術者への研修、専門技術者を派遣しての技術指導などを行っています。

環境放射線モニタリング等を行っている各都道府県の実務担当者向けの研修のほか、民間機関及び地方自治体の担当者を対象とした研修コースなど、幅広く環境放射能に関する分析・測定研修を実施しています。

ホウ素中性子補足療法 (BNCT) の開発実用化に係る研究開発や、放射性核種自動分離測定装置の実用化開発を行っています。

一步前へ **新技術開発への挑戦**

日本分析センターは、現在の分析技術に妥協せず、たゆまぬ努力による技術発展を目指し、新しい分析法の研究・開発を行っています。

お問い合わせは

公益財団法人 日本分析センター 企画・広報グループ
<http://www.jcac.or.jp> e-mail webman@jcac.or.jp

〒263-0002 千葉県千葉市稲毛区山王町295番地3
電話：043-423-5325 FAX：043-423-5372

放射線分野における科学技術の進展に貢献しています



～ 主な業務 ～

- 放射線影響に関する知識の普及・啓発
- 放射線影響に関する研究活動への奨励助成、顕彰
 - 放射線影響に関する調査研究
 - ICRP調査・研究連絡会の運営
- 原子力施設及び除染等事業場で働く放射線業務従事者の被ばく線量の一元的な登録管理
 - RI施設で働く放射線業務従事者の被ばく線量の登録管理
 - 放射線管理手帳制度の運用管理
- 国の指定を受けた放射線管理記録等の保存業務 (原子力、除染、RI等)
- 原子力施設等で働く放射線業務従事者を対象にした低線量長期間被ばくによる健康影響の疫学調査

公益財団法人 放射線影響協会

〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町1-9-16 丸石第2ビル5階
TEL 03-5295-1481 FAX 03-5295-1486 <http://www.rea.or.jp>

放射線従事者中央登録センター

TEL 03-5295-1786 FAX 03-5295-1486

放射線疫学調査センター

TEL 03-5295-1494 FAX 03-5295-1485

放射線利用事業の振興と
原子力の利用に係る知識及び技術の普及を振興するために

◆ **放射線・原子力利用の普及事業**

- ・ 技術誌「放射線と産業」の刊行
- ・ 「放射線プロセスシンポジウム」の支援

◆ **照射サービス事業**

- ・ **ガンマ線・電子線照射**：材料の耐放射線性試験、材料改質などいろいろな照射ニーズに応えます
- ・ 中性子照射：シリコンの半導体化

◆ **技術移転事業**

- ・ 産業界からの中性子利用のいろいろなニーズに応えます

◆ **原子力研修事業**

- ・ 第3種放射線取扱主任者講習
- ・ 教員免許状更新講習
- ・ 放射線業務従事者のための教育訓練
- ・ 原子力・放射線に関する研修会の開催

一般財団法人放射線利用振興協会

<http://www.rada.or.jp>

本部・東海事業所：〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4 TEL 029(282)9533
高崎事業所：〒370-1207 群馬県高崎市綿貫町1233 TEL 027(346)1639

賛助会員はこのスペースに無料で広告を掲載することができます（年2回以上）

日本放射化学会 賛助会員募集

本会の学会活動にご参加頂ける賛助会員をご紹介下さい

連絡先： 日本放射化学会事務局

E-mail: office@radiochem.org

