

CONTENTS

1. 放射線教育はどこに向かうのか？
2. 小規模放射線施設における排水設備の施工例
3. PETサイクロトロン放射化量評価と解体事例



紅葉と鎌倉大仏（撮影者：井上浩義氏）



公益社団法人

日本アイソトープ協会
Japan Radioisotope Association

発行日 平成 28 年 9 月 1 日
発行 公益社団法人 日本アイソトープ協会
(連絡先) 学術振興部 学術課 03-5395-8081

放射線教育はどこに向かうのか？



慶應義塾大学
医学部

井上 浩義

1. 緒言

先端科学技術は、国民的理解、関連政策決定等に関して、科学的理解と社会的理解が相伴って階層的に認知されていくことが望ましい^{1,2)} (図1)。しかし、情報量や与えられた情報の理解容易性に依存して、一方的な理解のみが進展する科学技術事例が存在する。放射線は、その利点と欠点が明確な価値相反的な先端科学技術の代表的事例である。このような中で、平成23年3月に発生した福島第一原発事故により国民の原子力・放射線に関する関心は急激に高まった³⁾。当該事故の発生により図1で示す科学的リテラシーの取得が進み、事故前に比べてその内容は格段に高度になった。一方で、当該

事故に対する嫌悪感・恐怖感は放射線を社会的に理解するためには阻害要因ともなり、放射線を、その歴史等を含めて総合的に理解する妨げになっている。いずれにせよ、近年、放射線教育に対する国民の要請はより専門的で高度なものとなっている。また、これと同時に科学的にも社会的にも均衡のとれた教育の提供が望まれている。これらの社会的要請に対して、本稿の読者の皆様の中には、国からの要請(例えば、環境省情報プラザ活動)、地方自治体とのアドバイザリー契約、放射線関連講演等で大きな関わりを持たれてこられた読者もいらっしゃるのではないかと拝察する。そもそも、読者である科学者、技術者、専門家等は公的身分、私的身

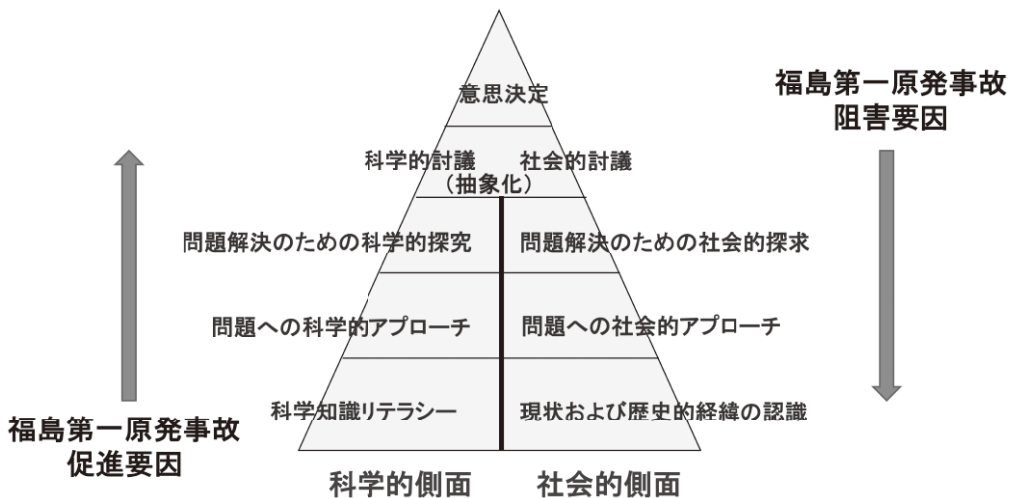


図1. 放射線理解に関する科学的側面・社会的側面

分に関わらず、自らの職務、ここでは放射線の研究開発及び利用に関して、公共空間を公衆や社会と公共空間を共有する（図2）。それぞれに社会的合理性と科学的合理性が成立する場合には、科学者等は社会等に関して自らの職務の説明責任を有する。この説明責任の一環として、放射線教育が利用され得るのである。

奇しくも、福島第一原発事故発生と同じく平成23年に改訂学習指導要領に基づく教育が実施され、31年ぶりに中学校理科で放射線が取り上げられることになり、国民の科学的リテラシーのひとつとして放射線学習が再び開始された。勿論、その内容は限定的であり、時間も十分ではない。これは我々が行なった全国の中学校理科教諭を対象としたアンケートでも明らかになっている。しかし、放射線教育全般を考慮する上ではオンキャンパス教育（学校での課程教育）で放射線が教えられることが重要である。我々専門家はオンキャンパスでの放射線の取り上げられ方を嘆くのではなく、逆に専門家として理科教諭への資料提供などの支援により学習内容を充実させる責務を負うのではないだろうか。

今後の放射線教育は、ある特定の専門家がある時、ある場所で実施するものではなく、放射線を科学リテラシーとして確立し、誰もが教育し、誰もが教育されるような環境を整えることが肝要である。また、そのことにより、我が国の放射線教育が原子力・放射線の利用が加速的に進んでいる世界の国々の規範となり得る。

本稿では、個々の先生方の放射線教育はなかなか掴めないため、筆者らが行ってきたオフキャンパス（学校外）放射線教育、中学生・高校生による放射線ディベート活動、定期的な教

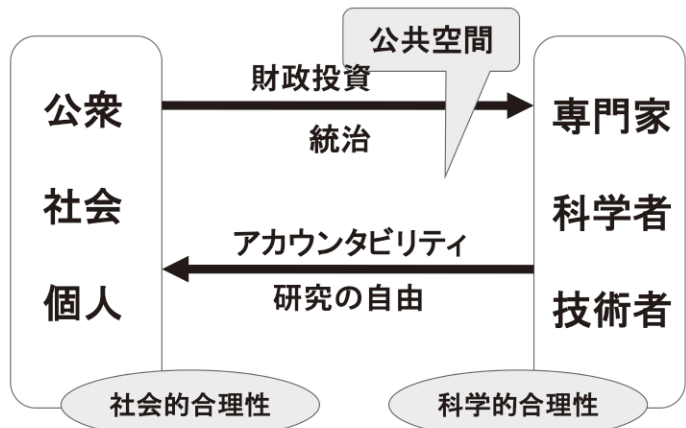


図2. 科学者等と社会等間に存在する科学技術研究と公共性との関係

科書記載調査、そして、次期学習指導要領改訂にて導入が予定されている高校の新教科「理数探求（仮称）」について言及する。本稿が放射線教育の現状と問題点を炙り出す一助になればと願っている。

2. オフキャンパス放射線教育

本稿を拝読頂いている読者の中には夏休みを中心にして継続的な放射線教育を実施されている方々もいらっしゃるものと思われる。筆者らも18年前から、小中学生を対象とした放射線教育活動「放射線を知っていますか?®」を夏休みに2回、全国各地で開催している（定員2回合計40名）。

当初は、1年に1回、2泊3日でみっちり放射線を教える講座を開設していたが、教える側も教えられる側も、合宿が終わった頃には疲弊してしまい、僅か2年で終了した。その後、現在の形式へ変更した。これら活動への参加希望者数は図3に示すように、近年、40名の定員に対して500名前後の応募が来るようになってきた。この理由としてはオフキャンパス放射線教育が一般の方々に根付いてきたこともあろうが、運営サイドからの感想では小中学生自身

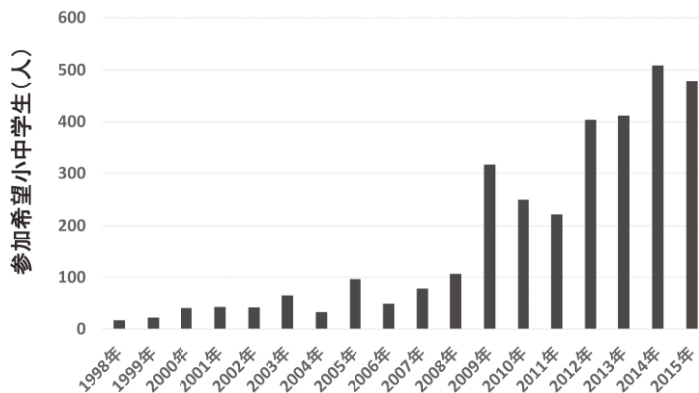


図3. オフキャンパス放射線教育活動「放射線を知っていますか?®」の参加希望者数

が放射線学習機会の獲得に熱心になってきている。18年前と比較すると小中学生の意欲と基礎知識が大きく異なる。昔は教えることが出来なかった高度な内容であっても現在では理解してもらえることは多々ある。

筆者らは、前述の真正面から取り組んでいる放射線教育の他にも、小学校4年生までを対象とした音楽会と放射線のコラボレーション教育活動、中学生を対象とした第2種放射線取扱主任者合格講座の開催、放射線教育のためのe-learningの開発などを行ってきた。が、挫折の連続であり、ここでは触れない・触れた

くない。

現在、筆者らは、放射線教育の垂れ流しではなく、自らの教育評価（人材育成評価を含む）や開発した教材評価に注力している。教育評価においては、他の教育的評価方法と同様にルーブリック（観点・基準の評価表）を用いて評価している。表1には放射線教育のグループディスカッションで使用するための質的なICEルーブリックを示している

る。ICEとは、カナダで開発・実践されてきた評価モデルで、IはIdeas（基礎知識）、CはConnections（つながり）、EはExtensions（応用）を意味する。本来はこのICEはそれぞれ別段階として評価に使用されるが、筆者らはこれを同時に評価している。また、教材評価に関しては、目指す放射線教育の「真実性」と「典型性」、並びに実際の教材活用から挙がってくる「具体性」、「直観性」、そして「意外性」を評価因子としている。これにより、放射線教育教材の良否だけでなく、使用に適した局面の判断を行なおうとしている（図4）。

要素	考え	つながり	応用
整合性	■ 仮説、素材の一覧、方法、結論、参考文献一覧が含まれている	■ 要素は一貫した形でお互いにつながっており、その間には流れがある	■ 議論が自分たちの考えをどう変えたかについて詳しく述べる
正確さ	■ 述べられていることはすべてデータに即して正確である	■ 述べられていることは、実際の研究結果やデータに裏付けられている	■ 議論や得られた結論がどうなるかについての予測がされている
プレゼンテーション	■ レポートは読み易く、口頭発表は聞き易い	■ 受け手のニーズが考慮されている	■ 議論の結果や個人の考察を創造的な形で発表しようとする努力が見られる

表1. 放射線教育のグループディスカッションで使用するための質的なICEルーブリック

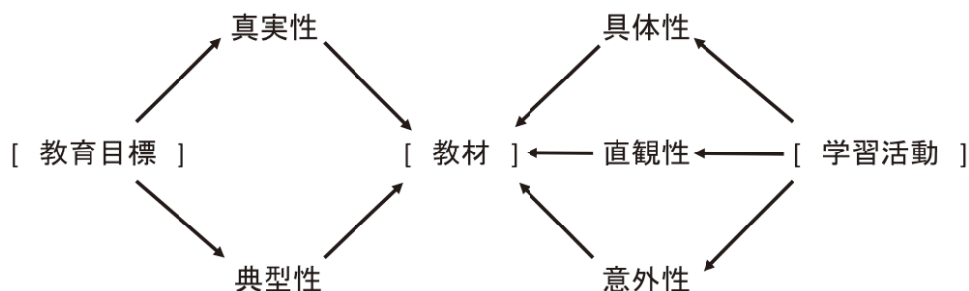


図4. 放射線教育教材におけるすぐれた教材の観点

3. ディベート活動

小中高校生の放射線に関する知識や関心を深耕するために、定期的に放射線・原子力に関するディベート活動を実施している。本稿ではこの中で、福島第一原発事故前後の2回について概要を比較した。事故前は平成22年12月11日（日）に全国から集まった小中学生14名、高校生15名、ディベート時間60分で開催した。事故後は、平成23年5月7日（土）に全国から集まった小中学生11名、高校生17名、ディベート時間60分で開催した。2回のディベートに集まった小中高校生は約半数が同一生徒であった。

ディベート活動は事前に配布した資料に基づいて、小中学生グループと高校生グループに分かれて行なった（図5の写真参照）。当日は、本ディベート課題「原子力・放射線」学習の先駆者である飯利雄一先生（元信州大学大学院教授；元文部省初等中等教育局視学官）及び放射線利用の専門家である田中隆一先生（元日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構）高崎研究所所長）に参加頂き、ディベート内容にコメントを頂いた。ディベート自体の効果測定については発言時間計測、フローチャートによる探求度計測などによって行なったが、ここでは参加者の事後アンケートの一部のみを記載する。

平成22年（事故前）

小中高校生：「ディベートの時間をもう少し長くして欲しい」、「（中学生から）高校生のディベートも見なかったです」、「このようにして欲しいとかではなく、やっぱり自分はずっとがんばらなれなれと思いました。ディベートでもうまくいかなかったし、まわりのレベルの高さに圧倒されっぱなしだった。それが今回だめだったと思う所です」などの意見が出た。また、保護者・教諭：「ディベートは子供自身が不安で何をするのか・・・と、気にしていましたが、自信につながったかと思います」、「息子のこれからの人生において大変貴重な体験をさせて頂き、心より感謝申し上げます」と感謝の意を述



図5. 放射線ディベート活動の様子（手前が高校生グループ；奥が小中学生グループ）

べたものが多かった。

平成23年（事故後）

小中高校生：「1つの出来事にも色々な捉え方があって、それらはやはりより多くの人の言葉を聞くことで知ることが出来るのだと思った」、「福島原発がどのようなものなのか、よくわかった。皆がどのような思いを持っているのか、知識がよく伝わった。日本のエネルギーについて興味がすごくわいた」、「前回12月に私は”原子力発電には反対”という立場でディベートを行ったので今回の原発事故にはとても興味がありました。そのうえでもう一度、今度は”原子力推進”の立場でディベートが出来たことは私にとって原発についてより深く考えるという機会になりました。これからも、沢山の知識を身につけ、発信していきたいと思います。ありがとうございました」などのディベートに対する肯定的な意見が頻出した。事故前開催時よりもアンケートのコメント量は倍増し、その内容もより深いものになっていた。また、保護者・教諭：「子供たちにとって、とても重要な活動だと思います。このような機会を活用させていただき、ありがとうございます」、「自分の意向をはっきりと伝えること、他の意見を受け付けることは、多くの場面で必要となることから、もっと機会を増やしてほしい。できれば5人程度で2対3ぐらいであると意見を伝えることがもっと活発になると思いました」、「本日を楽しみにしていました。とても有意義で”今後のエネルギー”について考えました。子供たちのこれから!日本の未来!私たちがこの手で作っていきたくて思いました」など、こちらもコメント数が多く、中には自分たちもディベートに参加したいという教諭もいた。

ディベートは生徒による能動的学習機会の提供もさることながら、放射線教育自体の深耕にも繋がる。一方で、放射線・原子力の専門家はディベートに意見を挟みたがる傾向がみられる

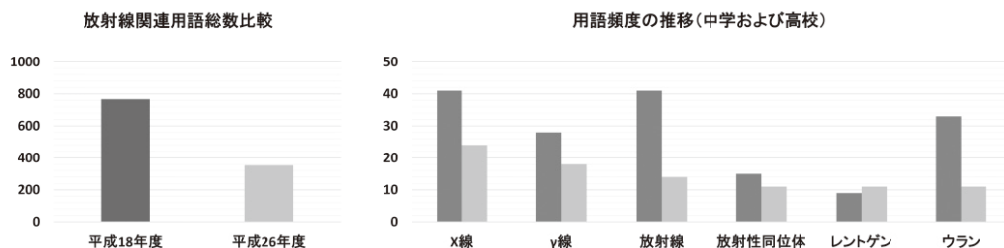
ので注意が必要である。

4. 教科書調査

緒言でも記したように平成20年に小中学校、平成21年に高等学校・特別支援学校の学習指導要領の改訂がなされた。それぞれの実施は、前者は平成23年から、後者は平成24年からであった。当該改訂に伴って、教科書も改訂されている。また、何度も記載するように平成23年3月には福島第一原発事故も発生した。我々は、定期的に、小中高等学校のすべての教科書について「放射線」あるいは「原子力」に関する用語の記載調査を行なっている。本稿ではその中で、福島第一原発事故前後の平成18年及び平成26年に出版された教科書について、放射線・原子力関連用語に関する調査結果について簡単に記載する。

調査は小学校、中学校、及び高等学校の検定教科書について、平成18年及び平成26年と同じ出版社の教科書を用いて、放射線、原子力に関する用語の検出を実施した。教科はいずれも、理科、社会、技術・家庭を対象とした。高等学校については一部、工業科の教科書についても対象とした。その結果、小学校では、理科において平成18年には記載があった原子力・放射線の記載は平成26年には見いだせなかった。一方で、社会科では歴史的な観点から多くの記載が見られた。中学校では、理科においては平成18年と平成26年には大きな差はなかった。現行の学習指導要領では、中学3年生で「放射線の性質と利用にも触れること」と明記されたが、用語の出現頻度からはそれほど増えてはいなかった。社会科では、地理、歴史、公民の各分野で原子力・放射線が取り上げられていた。更には、中学校では技術・家庭科でも原子力発電などが挙げられていた。現在、高校での理科履修形骸化が問題となっているが、放射線、原子力に関しては義務教育期間にそれに触れるこ

【理科】



【社会】

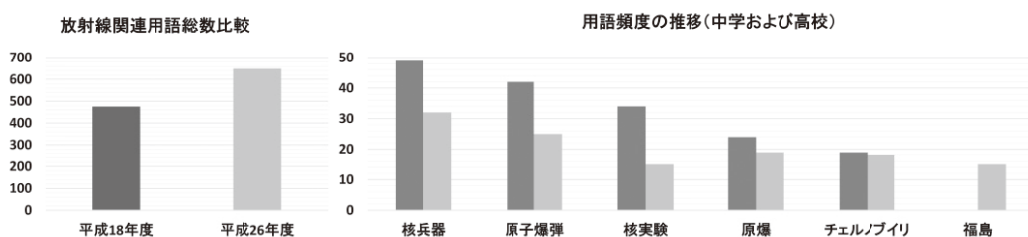


図6. 平成18年度と26年度の教科書放射線関連用語記載調査(理科・社会)用語は左カラムが18年度;右カラムが26年度

とができることは素晴らしいことである。高校では、理科では物理、化学、地学で取り扱われ、社会では、地理、歴史、公民で頻出していた。なお、高校の工業科でも取り扱われている(図6参照)。

5. これからのオンキャンパス放射線教育

近年、急速に進む産業構造の変化や国際競争力の激化に対応するために、あるいは、理数科系教科学習による客観的観察及び論理的思考能力の育成などを目指して、文部科学省では理数科教育の改革がなされてきた。平成26年12月に出された中央教育審議会の「新しい時代にふさわしい高大接続の実現に向けた高等学校教育、大学教育、大学入学者選抜の一体的改革について」のとりまとめでは、今後、高校教育における先端的理数科教育の充実が図られ、それが大学入学者選抜にまで反映される可能性が出てきた。マスコミ等では前述の大学入学者選抜の部分ばかりに焦点が当てられるが、科学教育の実務としては前述のような先端的な理数科教

育事業を今後普遍なものにする必要が生じている。また、そもそもの理数科教育改革の目的である国際化も同時に進展させることが必須である。これら理数科教育の一般化、国際化をすべて高等学校教諭に負担して頂くのはその仕事量や質の点からも難しい。そこでしばしば協働先として取り上げられるのが大学である。しかし、全国の高等学校が5,400余校あるのに対して、理系学部を有する大学は772校中200余校であり、地理的な要因を含めると理数科教育における高大連携を一般化するには大きな障壁があると言わざるを得ない。これに対して、少し古い統計ではあるが、平成20年で、製造業の数は238,000企業、事業所数は442,000ヶ所に及んでいる。また、博物館は平成23年度調査で、5,700余館に及んでいる。これらには多くの理系研究者・技術者及び学芸員が常駐している。文部科学省では、今後の理科や数学などの科目ではこの学校外の研究者や技術者の協力を想定しているのである。

そして、次の学習指導要領の改訂では、高等

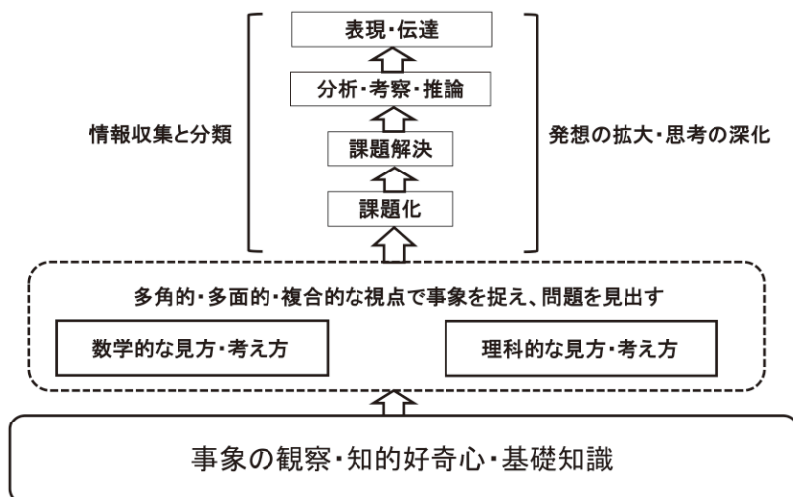


図7. 新科目「理数探求（仮称）」の学習ステップ
文部科学省中央教育審議会資料を一部改変

学校の新しい教科として「理数探求（仮称）」が設置される予定である（図7）。筆者はこの設置にかかわる中教審の分科会委員として議論を尽くさせて頂いた。この教科は理科と数学にまたがる内容を学ぶことで深い資質・能力を身に付けさせ、将来、学術研究を通じた知の創出をもたらすことができる人材の育成を目指すものである。この教科に関しては、まさに理科と数学との垣根を越えた融合学習を意図するものである。そして、我々、放射線管理に関わる者はこの融合、ボーダレスが得意である。物理、化学、生物、法令・幾つもの分野を、横断的視点をもって管理している。加えて、この新しい教科では前述した現状を踏まえ、大学や研究機関、企業等の機関及び個人の協力を得て、探求を進め、内容等に助言をもらうように提言されている。まさに我々の出番である。放射線あるいはそれに関連する技術等は今後、我々専門家が高校で直接生徒に指導し得るのである。

現在あるいは過去にスーパーサイエンスハイスクール（SSH）に指定されている高等学校では、この「理数探求（仮称）」を利用する可能

性が高い。既に放射線教育を行なっておられる先生、あるいはこれから始めようという先生は是非、この「理数探求（仮称）」にアンテナを張って頂きたい。

放射線教育は従来のオフキャンパス教育だけでなくオンキャンパス教育を含めた、大きな転換を迎えようとしている。本稿では筆者の経験が少ないために小中高校生を対象とした教育の現状を記載させて頂いたが、これからは生涯教育として今一度国民全体への放射線教育が必要である。世界で類を見ない放射線安全管理技術を持つ我が国の知恵を次世代に繋ぐためにも放射線教育を通じて、国民の理解と付託を得たいものである。

参考文献

- 1) National Science Education Council（長洲南海男監修）；第6章科学の内容スタンダード：全米科学教育スタンダード，梓出版社—東京（2001）
- 2) 揚村洋一郎；「エネルギーと環境」に関する指導の新たな試み、広領域研究，No.62 62-75（2006）
- 3) 井上浩義；わが国での今後の放射線教育はどうあるべきか？ 薬学雑誌 134（2）163-168（2014）

小規模放射線施設における排水設備の施工例



名城大学
薬学部

高橋 郁子

はじめに

名城大学薬学部では、非密封放射線施設の老朽化に伴い、新築する研究棟へ非密封放射線施設を旧施設の約7割に縮小して移設し、2013年度より利用を開始した。

新施設の排水設備について、オリジナルな方式を用いた排水システムを計画し、施工に反映したので紹介する。

一般的な方式の排水設備^{1), 2)}では、流入槽の下流に貯留槽と希釈槽を設ける。満水となった貯留槽の排水中の放射性同位元素の濃度を測定し、濃度限度を超えている場合は、希釈槽を使用して濃度限度以下に希釈し、希釈槽より放流する。濃度限度以下の場合には、貯留槽から直接放流する方式と、すべて希釈槽を経由して放流する方式がある。1986年施工の旧施設では、濃度限度以下の場合には直接貯留槽から放流する方式であった。しかし、本施設では旧施設の時代から現在に至るまで、30年間に希釈作業が必要となったことは一度もない。したがって、旧施設では、点検時以外に希釈槽の電磁弁等の可動部品を動かすことがなく、使用頻度の低い稼働部品類に固着等の不具合が起きやすいことが問題であった。新施設の排水系統においては、使用頻度の低い希釈槽の可動部品類における不具合の発生を防止する方法の導入が課題となった。

解決方法として、次のような方式に沿って、排水設備を計画し、施工に反映した。流入槽の

下流に排水槽を3基設け、使用頻度の極端に低い専用の希釈槽を設置せず、全ての槽に貯留・希釈の機能を設けることとした。従前と同様に排水槽1基が満水となるごとに排水槽内の放射性同位元素の濃度を測定して濃度限度以下であれば各排水槽から直接放流する。排水槽が3基あれば必ず1基が空いているので、希釈が必要であれば空いている排水槽を使って希釈作業を行い、その後、使用した排水槽の放射性同位元素の濃度を測定して濃度限度以下であれば該当する排水槽から直接放流する。この方式ならば、従前より排水設備の合理的かつ柔軟な運用が可能になると考えた。ただし、本方式は、高濃度の排水が貯留槽へ大量に流入する場合、高性能の放流用ポンプが必要とされる場合等では、適さないことがあり得る。

監督官庁への変更許可申請

設計時の監督官庁である文部科学省へ変更許可申請を提出する際、排水設備が基準に適合する能力を有するものであることを示す書面及び図面において、排水槽3基を、貯留・希釈槽3基とし、貯留・希釈槽の使用形態とローテーションについて表と文章で説明することにより許可を得た。すなわち、貯留・希釈槽1基が満水となるごとに槽内の放射性同位元素の濃度を測定して濃度限度以下であれば各貯留・希釈槽から直接放流することとした。一方、希釈作業が必要であれば空いている貯留・希釈槽を使って希

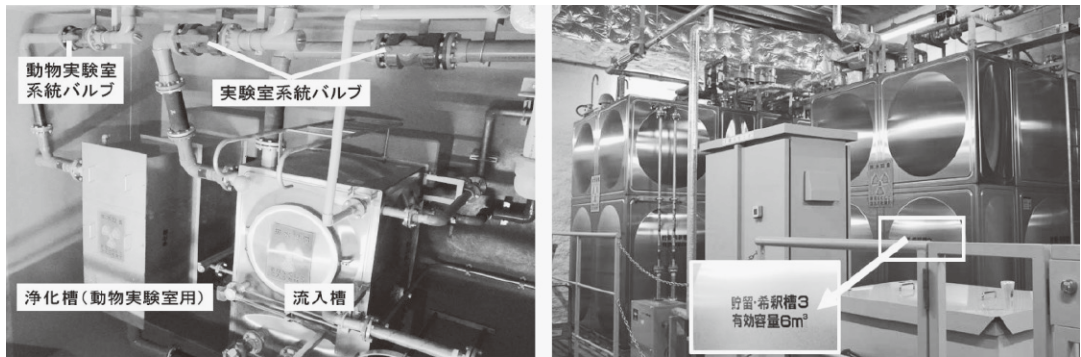


図1. 排水設備
左：実験室系統、動物実験室系統から流入槽への導水を示す
右：貯留・希釈槽を示す

積作業を行い、使用した槽の放射性同位元素の濃度を測定して濃度限度以下であれば直接放流を行うこととした。

排水設備の概要

本施設では、図1に示したように管理区域の排水系統を、実験室系2系統及び浄化槽を経由する動物実験室系統の、合わせて3系統として、ピット内配管とし、流入槽へ導水した。流入槽に入る手前には、系統ごとにバルブを設けた。各バルブを閉じ、流しから水を流して排水管に水を張れば、ピット内から配管の漏水調査ができる計画とした。

排水設備の排水槽は、図1に示したように、流入槽（容量：1.5m³、有効容量：1.0m³）1基、浄化槽（動物実験室用）（容量：2.5m³、有効容量：1.0m³）1基、貯留・希釈槽（容量：7.5m³、有効容量：6.0m³）3基から構成し、耐震Sグレードで施工した。ポンプ類はすべて水中ポンプとした。

水モニタについてはβ線測定用に液体シンチレータ及びプラスチックシンチレータを用いたβ線水モニタを、γ線測定にはNaI (Tl) シンチレータを用いたγ線水モニタを設置した。

本施設の排水設備では、流入槽及び浄化槽以

外の排水槽3基すべてを、貯留槽又は希釈槽として使用する。

配管経路の設計

流入槽から各貯留・希釈槽への配管経路について、従来のように流入経路と、移送・放流経路を2系統の完全な別配管とするには、各槽に移送経路が必要となり配管が煩雑になる。更に、本施設の場合、貯留・希釈槽3基と水モニタを設置するスペースが、約28m²と手狭である。そこで、配管は、図2に示したように流入経路と移送・放流経路を共有する本施設オリジナルの方式を考案した。具体的には、流入側と移送側の配管を切り分ける目的で電動弁を1台(MV-4)設けた。この電動弁の切替えによって同じ配管を流入管及び移送管の2つの用途で使用することを可能とした。その結果、従来方式の配管に比べて、配管の本数を約半分減じることができた。なお、電動弁の故障等不具合が発生した際のバックアップのために、各所に配置された電動弁にはすべてバイパス配管を設置し、手で弁の切替えができるように計画した。

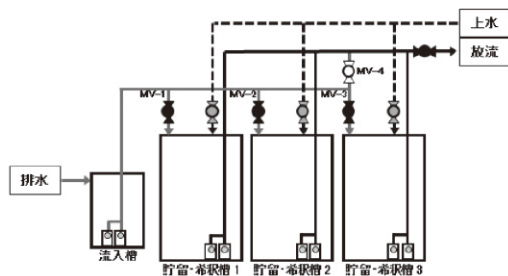


図2. 排水系統図

排水処理用 PLC (シーケンサー) の設計

PLC (シーケンサー) の動作は、流入槽からの排水の分配先が貯留・希釈槽3基すべてを選択可能とし、また、貯留・希釈槽3基のすべてを貯留槽及び希釈槽として使用するために、各槽間での移送、希釈移送が可能で、かつ、各槽からの放流ができる設計とした。この設計では、いずれか1基が必ず空となるため、万一、使用中の槽で漏水等のトラブルがあっても、緊急のバックアップが可能となる。また、貯留・希釈槽が空の間に内部を乾燥させることで、槽内に発生する細菌による汚れを防ぐ効果も期待できる。

貯留・希釈槽の点検用ハッチの蓋

本施設では、貯留・希釈槽の点検用ハッチ上部を給気用空調ダクトが通過することになり、円形片開きの蓋を使用すると、縦方向でダクトと干渉し、完全に開くことができない。完全に蓋が開かない状況は、メンテナンス時に危険を伴うため、図3に示したように、円形の蓋の大きさは変えずに、形状を左右2分割とし半円形の分割観音開き式とし、縦横両方向の必要スペースを約半分を縮め、ダクトとの干渉を避けて開閉できるようにした。

今後に向けて

本方式の排水設備を3年間使用した。この間に、バルブ等の可動部品、制御系、その他、排

水設備に関わる不具合は、全く起きていない。また、2016年度の初めに流入槽及び貯留・希釈槽の洗浄を行ったが、旧施設の排水槽の時と比べて、槽内で発生する細菌による汚れが減少した。これは、貯留・希釈槽の1基を常に空にするように設計した効果があったのではないかと考えられる。



図3. 貯留・希釈槽の蓋

旧排水設備を施工した1980年代から、この約30年間で、排水設備の施工においては、耐震に十分な配慮をした部材の使用と施工が徹底されるようになった。さらに、水中ポンプや電動バルブ等の高性能化、中でもPLC (シーケンサー) の高性能化で、より正確に細かい動きが制御できるようになった。結局、本方式の排水システムは、工業技術の進歩を巧みに応用することで、以前には不可能であったことを可能にしたに過ぎない。しかし、一方で、排水設備に限ったことではないが、保守作業に専門性が要求されるようになり、もはや施設の担当者のみでの保守管理は困難となっている。今後は、施設設備の計画において、メンテナンスに掛けられる経済力など施設側の管理運営能力と、施設・設備にどの程度までの利便性を持たせるかとのバランスの見極めが重要であろう。

参考文献

- 1) 福山博之：“講座 RI 実験施設の機械設備 (3)”，ダイゲン技報，63，pp46-51，1991
- 2) 福山博之：“ラジオアイソトープ実験施設”，建築設備と配管工事，pp 116-132，1992

PETサイクロトロン放射化量評価と解体事例



株式会社日本環境調査研究所
営業企画部 営業第一課

柳下 俊行

1. はじめに

放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律の一部を改正する法律が平成24年4月1日に施行され、放射化物は基本的に放射性同位元素によって汚染されたものと同様の規制を受けることになった。このため、医療用PETサイクロトロンを解体撤去する際に、放射化物の範囲の評価をどのように行うか検討し、3次元モンテカルロ計算コードによる方法と試料を採取して測定する方法を採用することとした。ここでは、それぞれの評価方法の概要及びサイクロトロンの解体事例を紹介する。

2. PETサイクロトロンの概要

PETサイクロトロンの主な構成要素は、イオン発生装置、加速箱、加速粒子取出装置及びターゲットであり、その周囲には様々な制御装置や遮蔽装置が取り付けられている。サイクロロン本体の主な成分は、鉄（ヨーク、セクターマグネット等）、アルミニウム（真空箱）、銅（電磁石）である。

一般にサイクロロンは、遮蔽方法により、「自己遮蔽体型」と「非自己遮蔽体型」の2つに分類される。自己遮蔽体型は、サイクロロン装置本体の周りを囲むように遮蔽材（材質：コンクリート、ポリエチレン、ボロン、鉛等）が設置され、自己遮蔽体外へ透過する放射線を低減できることから、サイクロロン室の壁厚が軽減される。これに対し、非自己遮蔽体型の施設では、サイクロロン室の構造材で放射線を遮蔽する必要があるこ

とから、壁厚は約1.5mとなっていることが多い。

今回、放射化物の範囲を評価、検討したPETサイクロロンは、自己遮蔽体型PETサイクロロン装置(IBA社製 CYCLONE 10/5)である。自己遮蔽体型PETサイクロロン装置及び自己遮蔽体を閉じた状況を図1及び図2に示す。

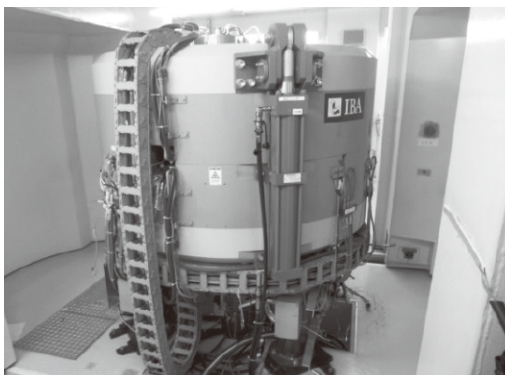


図1. 自己遮蔽体型PETサイクロロン装置
(IBA社製 CYCLONE 10/5)



図2. 自己遮蔽体を閉じた状況

このサイクロトロンには、ターゲットポートが8ポートあり、F-18用が2カ所、C-11用が2カ所、ビームダンプが2カ所、未使用が2カ所となっている。また、使用期間は2004年1月から2013年12月までの10年間であった。

10年間の使用時間は、合計で約2,600時間であり、そのうちF-18ターゲットポートでの照射が2,154時間と全体の83%を占めている。自己遮蔽体は鉄板で囲われており、内部はボロンを含有するコンクリートで、厚さ800mmである。

今回の作業では、PETサイクロトロン本体を全て放射化物とし、自己遮蔽体及び自己遮蔽体内床面に対して放射化物範囲の評価を行った。

3. 放射化領域の検討

自己遮蔽体及び自己遮蔽体内床面の放射化領域の評価は、3次元モンテカルロ計算コード（以下、コード計算）とコアボーリングにより試料を採取して、 γ 線スペクトル測定及びH-3測定（以下、サンプル測定）の結果を用いて検討を行った。

サンプル測定の場合次のような課題がある。

- ①採取した試料は対象領域全域をカバーすることができない。
- ②採取箇所が測定対象面で最も高い（評価濃度が安全側である）とは限らない。

一方、コード計算では次のような課題がある。

- ①中性子捕獲による放射化の原因となる微量元素（例えばCoやEu等）の分析による誤差が生じることがある。
- ②計算体系を完全に実物の形状と一致させることが難しい。
- ③計算体系の自己遮蔽体構造が均一であるとは限らない。

以上のことから、今回の自己遮蔽体の放射化領域評価では、コード計算とサンプル測定の両

者を用いることで、相互に補完する方法とした。

コード計算はできるだけその精度を高めるため、本体や付属機器を製造したメーカーから入手した構成部品の機器寸法図、材質等の詳細なデータ及び機器設置時の竣工図等を用いて、解析対象の幾何学的形状を設定した。

また、過去の運転記録を調査して、使用したターゲットポートや加速時間等の運転条件を入力した。

さらに、自己遮蔽体及び自己遮蔽体内床面から試料を採取して、誘導結合プラズマ質量分析法（ICP-MS）等を用いて微量成分の分析を行った。

これらの情報を基に、輸送計算をPHITS2で、放射化量をDCHAIN-SPで算出した。計算体系の概要を図3に示す。

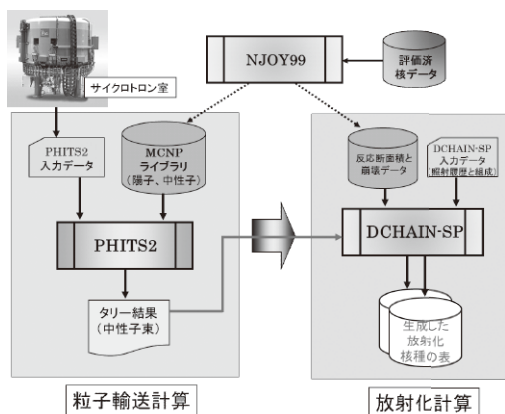


図3. 計算体系

コード計算結果の一例を図4に示す。この結果、自己遮蔽体の放射化分布はスポット状の放射化が無く、連続的に分布していることが確認できた。また、ターゲット高さの放射化が最大となることが分かった。

サンプル測定では、コード計算で求めた放射化量が最も高いターゲット近傍（コア④、⑤）、自己遮蔽体内側床（コア①、②）、放射化が低いと考えられる箇所（コア⑥）及び放射化が無

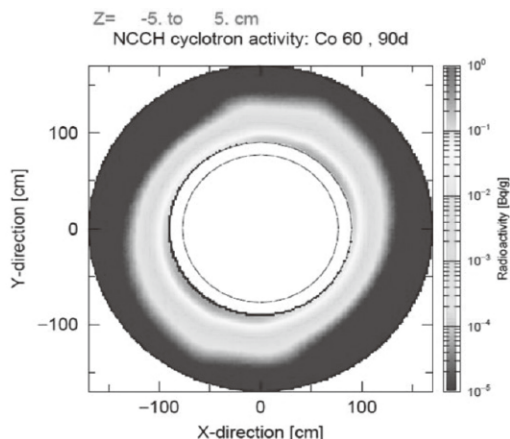


図4. コード計算結果の例 (Co-60)

サイクロトロン停止後、90日後の結果
高さは、ターゲットの高さ(FL1200mmを中心とし、±5cmの領域)

いと考えられる箇所(コア③、⑦)でサンプル試料を採取した。サンプル測定の採取ポイントを図5に示す。

コアボーリング試料は、1cm～2cmの厚さに切断して粉碎しU8容器に封入してγ線スペクトルを測定し、次に一部を分取して加熱回収法によりH-3濃度を測定した。

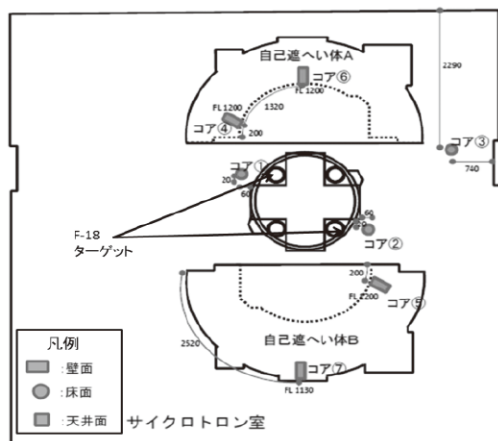


図5. サンプル試料採取ポイント

コード計算により求めた濃度とサンプル測定における実測値との比率を表1に示す。

この結果、計算値は実測値より全て1より大きく、安全側に評価されていることが分かる。しかし、Co-60については3～7倍と大きく異なっている。これは自己遮蔽体に含まれる微量元素の成分分析結果に起因すると考えられる。

自己遮蔽体内のコンクリートは中性子遮蔽のため、ポリエチレンビーズやホウ素等が不均質に含まれる構造となっている。これにより微量元素であるCo成分分析試料の代表性が失われていた可能性が考えられる。

表1. コード計算結果と実測値との比

核種	計算結果と実測値との比(計算結果/実測値)
Sc-46	1.12～2.10
Co-60	3.11～7.07
Cs-134	1.39～2.02
Eu-152	1.72～2.04

以上のことから、自己遮蔽体ではコード計算により放射化が最も高くなると評価されたターゲット高さ付近から試料を採取して測定し、試料中の放射性物質が検出されなくなる深さまで、自己遮蔽体内側全域を放射化物として撤去することが安全側であると判断した。また、ターゲットが主な中性子源であることから、床面ではターゲット直下のコンクリート試料の実測値が検出されなくなる深さまで、床面コンクリートの全面を撤去することが安全側であると判断した。

これらにより、放射化領域は、サイクロトロン本体、自己遮蔽体内側鉄板(厚さ9mm)、自己遮蔽体内側コンクリート(深さ10cm)及び自己遮蔽体内床面コンクリート(深さ20cm)と設定した。

4. 放射化物の解体と集荷

サイクロトロン本体及び自己遮蔽体を解体撤

去する際に、発生した廃棄物を収納するため、(公社)日本アイソトープ協会(以下、RI協会)より銅製角型容器(以下、 1m^3 コンテナ)を借用した。 1m^3 コンテナには金属のみ収納可能であり、重量が2tまでと制限があるため、サイクロトロン本体をヨーク、セクターマグネット、電磁石、真空箱、脚等に解体した。サイクロトロン解体の作業状況を図6に示す。なお、サイクロトロン本体(IBA社製 CYCLONE 10/5)は、全重量約14tである。

解体した各部品の表面1cm線量当量率を測定する際は、他の部品からの影響を考慮して、サイクロトロンとホットラボ室間の壁を開口してホットラボ室に運搬して行った。

1m^3 コンテナに収納する際にはこれらのデータとともに、収納した部品の名称や材質を記録し、内部の状況を撮影して放射化物のリストを作成した。



図6. サイクロトロン本体解体作業

ただし、ヨークは外寸直径約150cmで重量約2.7tと大きいため、そのままでは 1m^3 コンテナに収納することができない。このため、サイクロトロン室内にて4分割に切断して廃棄することとした。ヨークの切断状況を図7に示す。

また、自己遮蔽体外側には鉄板9mmで覆われているため、これを除去した後にコンクリート

のはつり作業を行った。自己遮蔽体のはつり作業を図8に示す。



図7. ヨーク切断状況



図8. 自己遮蔽体のはつり作業

ヨークの切断や自己遮蔽体のはつりをする時は、周辺への汚染拡大を防止するため、サイクロトロン室内部にグリーンハウスを設置し行った。グリーンハウス内は、HEPA付局所排風機を設置し、陰圧を保って作業を行った。作業員は、ヘルメット、タイベック、手袋及び全面マスク等の保護具着用し作業を行い、グリーンハウスを退出する際は、身体サーベイを実施した。また、定期的にグリーンハウス内の空気中の放射性同位元素濃度を測定した。作業時の作業員の被ばく線量及びグリーンハウス内の空気

中放射能濃度測定の結果は、全て検出限界未満であった。

前項に述べた自己遮蔽体及び床面の放射化領域と判断した部分を撤去した後、NaI (TI) シンチレーションサーベイメータを用いて表面の1 cm線量当量率を測定した。その結果、全ての測定ポイントで検出限界未満であった。また、撤去後表面のコンクリートサンプルを採取し、Ge半導体検出器を用いて γ 線スペクトルを測定して、全てのポイントで検出限界未満であることを確認し、作業終了とした。

作業時に発生した放射性廃棄物量を表2に、1m³コンテナの収納状況を図9に示す。

表2. 放射性廃棄物量

項目	容器	発生本数	内訳
非圧縮性不燃物	1m ³ コンテナ	9 個	金属等
非圧縮性不燃物	200ℓドラム缶	34 個	コンクリート等



図9. 1m³コンテナ収納状況

1m³コンテナに収納した廃棄物は、RI協会により特別に集荷を依頼した。今回の作業では廃棄物量が多く、保管場所を必要とするため、

集荷は3回に分けて実施した。1m³コンテナの集荷状況を図10に示す。



図10. 集荷状況

5. まとめと今後の課題

今回、自己遮蔽体型PETサイクロトロン装置の解体廃止において放射化領域を評価するため、3次元モンテカルロ計算コードを用いた方法と自己遮蔽体等から採取した試料を測定する方法を用いて、それぞれが持っている特徴を相互補完した。これにより、放射化物を十分安全側の範囲で処理することが可能となった。

しかし、3次元モンテカルロ計算では、試料の実測値よりかなり大きな値となる場合があった。このため、自己遮蔽体や床面コンクリートに含まれる、放射化の原因となる微量元素（例えばCoやEu）の成分分析の精度を更に向上させる必要がある。

また、3次元モンテカルロ計算では幾何学的形状の入力に多くの時間と労力を要する。よって、サイクロトロンの種別毎に標準的な形状を設定することで、より簡易的な計算の可能性を検討することが重要と考えている。