



Photo M. Abe

## Index

迎春のごあいさつ.....	山口 和彦	1
重イオンビームを用いた品種改良技術の開発とサクラ新品種の育成 .....	阿部 知子・林 依子	2
「放射線安全科学」徒然草 -30年続いた放射線防護研究会の活動に思うこと-	加藤 和明	7
放射線測定器のトレーサビリティと校正について.....	柳田 弘	13
〔サービス部門からのお願い〕 使用者変更のご依頼をされる際は.....		19

# 迎春の

# ごあいさつ



株式会社 **千代田テクノル**  
代表取締役社長 山口 和彦

新年あけましておめでとうございます。

皆様におかれましては健やかに新年を迎えられましたことと、お慶び申し上げます。

昨年、2名の日本人がノーベル賞を受賞されるといううれしいニュースがございました。その受賞者のお一人である東京大学宇宙線研究所 所長 梶田隆章教授には本誌2009年8月号に「宇宙線研究の今」を執筆いただいております。(下記の弊社ホームページより閲覧が可能です)このようなご縁を頂戴し、まことに喜ばしく存じております。受賞された皆様へ心よりお祝いを申し上げます。

さて、現在、皆様へ提供させていただいているガラスバッジによるモニタリングサービスが昨年、累計測定件数5,000万件を達成いたしました。これもひとえに、皆様方のおかげと心より感謝申し上げます。今後も皆様に満足いただけるサービスをご提供しつつ、6,000万件、7,000万件と継続できるよう邁進する所存でございます。

私事ではございますが、昨年還暦を迎えました。近年は平均寿命も延び、60歳といえども若い方に負けずご活躍されている方々が多くいらっしゃいます。弊社も間もなく創立60周年を迎えますが、これまで築いてきたノウハウと技術力を結集し、益々の技術・サービス向上を目指して参ります。弊社の活動が、我が国の放射線安全利用文化・技術の発展に少しでも貢献できるよう努めるとともに、FBNewsの誌面をより充実すべく、社員一同進めて参ります。

末筆となりましたが、皆様のご健勝と益々のご発展を心よりお祈りいたします。

本年もどうぞよろしくお祈り申し上げます。

\*千代田テクノル ホームページ FBNews No.392 2009年8月号「宇宙線研究の今」梶田隆章氏  
<http://www.c-technol.co.jp/cms/wp-content/uploads/2014/04/392fbn.pdf>

- |           |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|
| 代表取締役会長   | 細田 敏和 | 取 締 役 | 草尾 豊  |
| 常 務 取 締 役 | 竹内 宣博 | 取 締 役 | 福田 達也 |
| 常 務 取 締 役 | 安川 弘則 | 取 締 役 | 馬場 一郎 |
| 常 務 取 締 役 | 今井 盟  | 取 締 役 | 井上 任  |
| 取 締 役     | 松田 芳典 | 取 締 役 | 吉田 浩一 |
| 取 締 役     | 畑崎 成昭 | 監 査 役 | 本圖 和夫 |

# 重イオンビームを用いた 品種改良技術の開発とサクラ新品種の育成

阿部 知子\*1、林 依子\*2

## 1. はじめに

理化学研究所（理研）には、正門・西門・南門に桜の大木が、食堂脇や広沢池から南地区への坂道に桜並木があり、春先はそれぞれが思い思い桜の下でのランチタイムや写真撮影を楽しむ風景が広がる。日本で最古の桜（サクラ）をHPで調べると、山高神代桜（山梨県北杜市）樹齢2000年と伝わるエドヒガンサクラとある。また奈良時代より伝わる古い品種としては、‘奈良八重桜’、‘関山’、‘普賢象’などがある<sup>1)</sup>。私たちはなんと長い間、サクラと共に世代を重ねてきたのだらうと、圧倒される。理研は、重イオンビーム照射により誘発した変異体を用いてサクラの新品種‘仁科蔵王’、‘仁科乙女’、‘仁科春果’、‘仁科小町’を育成した。一般的に多様なサクラがどうやって生まれてきたかという、交配によるものである。新しいサクラや枝変わり（自然突然変異）などが発見され利用されることもある。そして枝変わりでは不十分なときに、人為的に突然変異を誘発

する技術が使われる。その技術は、1) X線・ $\gamma$ 線などの放射線照射、2) アルキル化剤・核酸塩基アナログなどの化学物質処理、3) トランスポゾンやT-DNAを用いる遺伝子改変、4) 組織培養過程の体細胞変異などに分類される。1990年代に日本では、重イオンビーム照射施設が建設され、新たな変異原として、放射線で最も大きな影響を生体に与える重イオンビームが使えるようになり、これを用いた植物の品種改良技術の開発が始まった。重イオンビームは、原子核を加速したものであるが、がん治療に用いる重粒子線と言った方が身近かもしれない。放射線医学総合研究所に重イオン加速器が整備されるまで、がん治療のための基礎研究は理研加速器施設で行われていた。現在、生物照射チームでは、動物用であった生物照射装置を改良し、RIビームファクトリー（RIBF、図1）で、植物や微生物に重イオンビームを照射し突然変異を誘発する技術を開発し、ユーザーとの共同研究により変異体を使って新しい品種育成を行っている。本稿では、重イオンビームを用いた品種育成技術の開発とともに、サクラの品種改良を中心に実用化について紹介する。

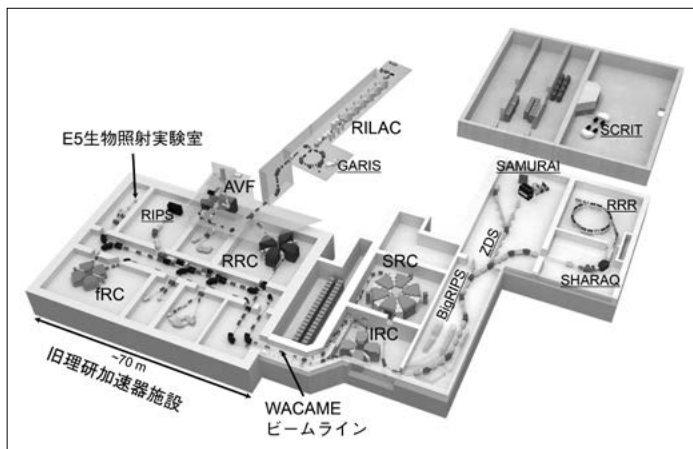


図1 RIBFのレイアウト

## 2. 重イオンビームの変異原としての有効性と実用化

世界にある大きな重イオン加速器施設は、物理学の研究所に核物理学研究のために建設され、その実験に使われる時間（ビームタイム）は、物理学のためにあり、生物学者にはアクセスしにくい。ところが、理研は総合科学研究所で

\*<sup>1</sup> Tomoko ABE 理化学研究所仁科加速器研究センター 応用研究開発室長 生物照射チーム リーダー（兼務）  
\*<sup>2</sup> Yoriko HAYASHI 同 生物照射チーム テクニカルスタッフ

あり、日本の現代物理学の父と言われる仁科芳雄主任研究員（当時）が、1937年に第1号サイクロトロンを建設して以来、非核物理学分野にもビームタイムを配分するという伝統がある。例えば1939年に、サイクロトロンで発生した中性子によるショウジョウバエの突然変異誘発効果を報告している<sup>2)</sup>。更に1989年に完成する理研加速器施設（RARF）では1975年の計画当初より、がん治療の基礎研究のための生物照射用ビームラインおよび照射室の整備が予定されていた。ここでは、1993年に重粒子線がん治療装置（HIMAC）が完成するまで動物照射実験が主に行われた。このように重イオン加速器施設に生物学者がアクセスできる条件と生物用実験設備などが整っていたため、植物照射実験は、1990年より開始され、1993年より品種改良研究へと展開した。

従来法であるγ線やX線では、二次的に発生したラジカルが細胞核に広がり、その化学反応で、DNAの一本鎖が切断されるため、遺伝子上の全領域が影響を受けて変異が誘発される。一方、重イオンビームは、高い線エネルギー付与（LET）を持ち、局所的にその軌跡に沿って半径数nm程度の範囲に重なるDNA二本鎖を電離作用により切断する（図2）。このように作用性が異なり、新たな変異原として期待できたため、1花に1,000粒以上の種子ができるタバコを用いて、変異作用を受けやすいとされる花（受精胚）<sup>3)</sup>への照射実験によりその変異効果を調査した。従来法では半致死線量で変異選抜を行うが、重イオンビーム照射では生存に影響を与えない低線量照射で変異体が得られ、変異幅も広いことが判明した<sup>4)</sup>。重イオンビームは変異原として有効であったので、さらに効率的な照射技術の開発などを続けながら、1996年から共同研究により実用化品種の育成に取組んだ。その結果、1998年の照射サンプルより、新色大輪化ダリア‘ワールド’、新色

ペチュニア‘ローズ’、不稔で花持ちが良くなったバーベナ‘コーラルピンク’という2001年から相次いで市販される新品種の育成に成功した<sup>5)</sup>。重イオンビームによる品種改良は、低線量照射で十分であるため、目的とする形質以外、農業上有用な形質を破壊するリスクを低減でき、変異体そのものが新品種になり得れば、品種育成期間の短縮へつながる。実際、組織培養体に重イオンビームを照射し、変異体を選抜、変異体クローンを増殖する先の花卉植物では、1年目に選抜した変異体は2年目にクローン苗で形質の安定性を調査し、3年目は市販のためクローン苗の大量生産という工程であった。

### 3. 品種改良ユーザー会と生物自動照射装置の開発

\*\*\*\*\*

新品種が市販され、1999年に国内24団体だったユーザー数は2001年には2倍となったので、品種改良ユーザー会を組織した。日本育種学会第100回講演会においてグループ研究集会として、第1回ユーザー会「RARFにおける植物への重イオン照射の現状」を開催し、品種改良ユーザー会報告書2001を出版した。その後、ユーザー会は2年に一度開催し、2015年度には、2016年1月21日～22日に第8回ユーザー会を開催予定である。現在、ユーザーは国内164団体、海外16団体となった。

RIBFでは、軽いイオンとして炭素・窒素・ネオン、重いイオンとしてアルゴン・鉄イオンに生物照射実績が豊富である。軽いイオンは水中飛程が23～40mmあり植物サンプルを通過するのに十分長く、変異誘発に必要な線量を数秒から数分で照射できる。また重イオンビームでは核種や速度を選択することによりLETを制御できる。一般的にLETが大きいと生体に与える影響は大きいとされているが、先行する動物細胞の研究から、致死作用に最も効果的なLETは110-124keV/μmであること<sup>6)</sup>、炭素照射ではγ線照射よりDNAが大きく欠失する割合が高まることなどが示されていた<sup>7)</sup>。そこで、LETの変異誘発に与える影響を精査するためLET精密制御装置としてレンジシフターを、またユーザー増加に対応するため自動

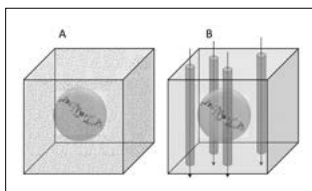


図2  
細胞に対する放射線の作用のイメージ  
A. ガンマ線  
B. 重イオンビーム

試料交換装置を、2003～2004年に生物照射自動化装置として整備した(図3)。レンジシフターは種々の厚さのアルミ製エネルギー減衰板にビームを通し、ビームエネルギーを減少することによりLETを選択することができる。例えば、炭素イオンでは素通しの22keV/μmからブラッグピーク(重イオンビームが停止するときに一気にエネルギーを放出する)290keV/μm、ネオンイオンでは素通しの61keV/μmからブラッグピークの700keV/μmまで1回の照射実験でLETを変化させることができる。自動試料交換装置では、乾燥種子・吸水種子・培養体・培養細胞・穂木・挿し穂などの照射サンプルはそれぞれに適した試料容器に収め、その種類ごとに製作したカセットにセットし、カセットはステージ上に設置する<sup>8)</sup>。サクラの穂木など、不定形の場合は、袋に入れて板にテープで固定していたが、1つ1つをテープで固定するのは作業効率が悪いので、2013年に枝を収め板にワンタッチで固定できるアルミケースなどを新たに設計した。これらの装置開発によって1時間に最大30個であった照射個数は50個に増加した。



図3 生物照射自動化装置

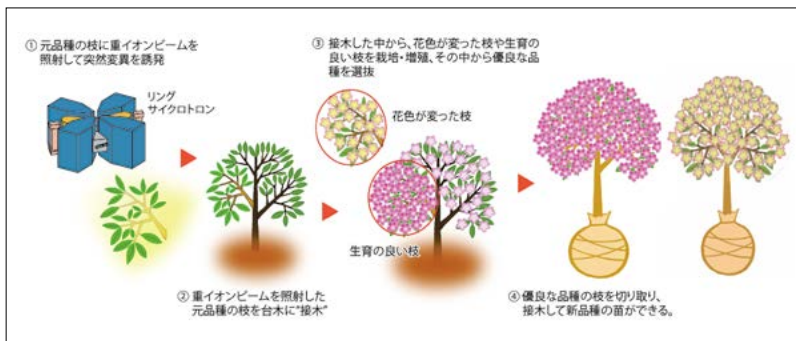


図4 重イオンビーム品種改良法を用いたサクラの新品種育成(理研HPより)

#### 4. サクラの品種改良 理研品種登録一号 ‘仁科蔵王’

2003年10月に山形市のサクラ生産農家、石井重久氏(JFC石井農場)から熱心な問い合わせが届いた。夢は真夏に咲くサクラや青いサクラを育成することで、自然突然変異で新品種を育成した経験が有り、新たな変異原として重イオンビーム照射に興味があると言う。まずは黄色いサクラの育成がご希望で、花卉が黄色に近いサクラはあるが、緑色の部分がありそれが少なくなると、より黄色になると言う。そこで、緑色のサクラ品種として親しまれている‘御衣黄(ぎょいこう)’に重イオンビーム照射を試すこととなった。照射材料として1mもあるサクラの枝が届いた。そこから枝の保存の仕方、接ぎ木に必要な枝の長さを元にした穂木の調整法などを相談し、2004年3月に炭素イオン(核子あたり135MeV、LET 22.6keV/μm) 10～20Gyをサクラ穂木に照射した(図4)。照射穂木は‘御衣黄’と相性がよく、病気に強い‘青葉桜’の台木に接木し、花が咲くのを待った。2006年5月、10～15Gy照射区22本の穂木のうち生存個体4つに花が咲き、緑色の部分を僅かに残すのみとなり淡黄色の花を着ける変異体1個体が得られた。この変異体はすべての枝に同じ変異花が咲き、変異形質は安定していた(表1、図5)。2007年5月初旬にも2006年同様に淡黄色の花が開花し、変異形質が非常に安定していたため、野依前理事長に‘仁科蔵王’と名付けて頂き、2007年10月に理研初の品種登録出願し、苗木は2008年秋から販売を開始した。

#### 5. サクラの品種改良 ‘仁科乙女’以降

次に育成したのは、‘仁科乙女’である。切り花生産のサクラ‘山形13系敬翁桜’穂木10本に、2006年2月に炭素イオン10Gyを照射し‘敬翁桜’に接ぎ木をした(図4)。1年後に



仁科蔵王 仁科乙女 仁科春果 仁科小町

図5 サクラの新品種(理研HPより)

表1 重イオンビームを用いた品種改良技術で育成したサクラ品種

	御衣黄	仁科蔵王	敬翁桜(山形13系統)	仁科乙女
開花	ソメイヨシノより2週間遅く開花	御衣黄と同じ	開花のための休眠打破に8℃以下1000時間必要	低温での休眠打破が不要
花色	緑白~明紫赤 明黄緑の筋	淡黄緑~淡黄ピンク 淡黄ピンクの緑に明黄緑の筋	ピンク	ピンク
花の大きさ	3 cm	4~5 cm	小輪	敬翁桜と同じ
花卉の数	10~12	7~8	5	敬翁桜と同じ
その他特徴	八重	半八重	1花の持ちは2週間 挿し木成功率75%	1花の持ちは秋花で4週間 挿し木成功率90%

生存していた枝は7本あり、そのうち、生長の良い3本について挿し木苗を増殖したところ、そのうち2系統が2007年秋に花が咲いた。1系統の個体は開花後枯死したが、もう1系統は温室で栽培を続けたところ、春にも再び花をつけた。温室でさらに栽培を続けると、花の分化がそろわず、連続して花が咲く四季咲き性を示した。この変異体はピンク色の一重の可憐な花を咲かせることから‘仁科乙女’と名づけた(表1、図5)。一般的に日本のサクラは、夏に形成された花芽が晩秋に休眠し、冬の寒さにさらされて休眠打破することによって、早春に花芽が生長し開花に至る。ところが‘仁科乙女’は、低温にさらさなくても、花を咲かせることができる。2009年12月に、理研と石井農場は、‘仁科乙女’を品種登録出願し、2010年3月より販売を開始した。2012年9月に品種登録出願した実が甘くて食べれるサクラ‘仁科春果’やぼんぼり咲きのサクラ‘仁科小町’は、八重咲きのサクラ‘春月花’の穂木に炭素イオンを照射し、接ぎ木して開花した照射集団内で自然受粉させ、後代の種子を得て、その種子を栽培した開花集団から育成した新品種である。‘仁科蔵王’と‘仁科乙女’は変異体そのものを新品種とした直接利用品種であるが、‘仁科春果’と‘仁科小町’は照射した枝そのものには大きな変化は無く、交配を経た後代で有用形質が得られた間接利用品種である。間接利用

品種では、一重の桜では最大級の新しいサクラの育成にも成功しており、品種登録準備中である。

## 6. LETの変異誘発および変異領域に対する影響

\*\*\*\*\*

LETによる破壊する遺伝子に対する影響は明らかになっていなかった。そこで、植物での変異遺伝子解析は時間がかかるため、まずはマーカー遺伝子を導入した微生物を用いて、遺伝子破壊領域の大きさがLETに依

存するかを検討した。その結果、23-40keV/ $\mu\text{m}$ の炭素より640keV/ $\mu\text{m}$ の鉄イオン照射においてDNA欠失変異の出現率が上昇し、欠失領域も大きくなることが判明した<sup>9)</sup>。これに自信を得て、遺伝子がすでに判っている既知変異体を選抜し、その過程で生存率および変異率を測定し、植物での変異解析を開始した。その結果、ソバ<sup>10)</sup>やシロイヌナズナ<sup>11)</sup>で致死効果に有効なのは300keV/ $\mu\text{m}$ 付近であることが示され、シロイヌナズナでは変異率がLET30keV/ $\mu\text{m}$ <sup>11)</sup>で高くなった(表2)。また、シロイヌナズナの変異体を用いて、PCRで変異遺伝子を解析したところ、22.5~30keV/ $\mu\text{m}$ では、数bp(塩基対)から数十bpの小さな欠失変異が殆どであった<sup>12)</sup>。一方、致死効果の高い290keV/ $\mu\text{m}$ 照射では、変異率は低下するが、誘発される変異体では、DNAの小さな欠失の割合は低下し、大きな欠失や逆位・転座など複雑な染色体の再構築が検出された<sup>13,14)</sup>。これによりLETを選択することにより破壊する遺伝子のサイズや変異の種類を選択できる可能性が示唆された。即ち30keV/ $\mu\text{m}$ 照射は機能欠失変異体を高頻度に得られるので、ピン

表2 LETがシロイヌナズナの変異率に与える影響

イオン	LET(keV/ $\mu\text{m}$ )	M <sub>1</sub> 個体数	M <sub>2</sub> 個体数	変異体数	変異率(%)
C	22.5	3,734	27,765	11	0.04
	30.0	3,056	29,595	23	0.08
	290.0	5,863	57,771	23	0.04

ポイント品種改良や逆遺伝学に有用であり、また大きなLET照射では、特に数kbから数十kbの巨大欠失が多く、全遺伝子の10%程度を占める直列で重複した遺伝子（タンDEM重複遺伝子）を一度に破壊でき、それらの遺伝子機能解析に有効と考えられる。

## 7. おわりに

一遺伝子破壊やタンDEM遺伝子破壊、染色体再構築に適正のLETを様々な植物で精査し、ユーザーの目的に応じたオンデマンド変異誘発技術を開発する。微生物では鉄イオン(640keV/ $\mu\text{m}$ )照射において、清酒酵母で有用系統が得られ<sup>15)</sup>、ノリ、ワカメやキクでもアルゴン照射により新奇変異体を得られるなど生物学でも高エネルギー重イオンビームの必要性が示された。そこで、もう一台のサイクロトロン(IRC)で加速したビームを生物照射室に戻すWACAMEビームラインを整備し、生物研究に利用できる核種やエネルギー領域を増大した。今後はWACAMEビームラインで発生する重イオンビームによる育種技術を開発し、高次倍数性作物・藻類・菌類への適応を促進する。

イネ・トマト・コムギなどでは、突然変異体の大規模集団(ミュータントパネル)の整備が進み、重イオンビーム照射系統も新たに仲間入りしている。身近となった次世代シーケンスを使った遺伝子解析により、多様な植物でゲノム情報を活用した遺伝子同定が可能となれば、変異体は遺伝子機能解析の強力なツールとなりえる。そこで重イオンビーム照射変異体について、変異遺伝子の効率的な同定方法を開発し、変異体を使って遺伝子同定および機能解析を行うMutagenomics研究を生物学の新領域として確立する。

重イオンビームを用いた品種改良技術の開発を続けてこれたのは、植物組織培養が可能で、短期間に花が咲き、目的も花色や花型という目で見て判るものから成功例が出たのが始まりではあるが、何よりも、ユーザーの方々の熱意に後押しされたものと感謝している。花で始まった品種改良は、草丈の低いソバ、ヒエなどで成功例が出て、サクラでも圧倒さ

れたのに、いよいよ1世代では完成しない樹木へと広がりを見せている。私たちは、今後も理研の伝統を引き継ぎ、物理学と生物学のシナジー効果を最大限発揮でき、品種改良ユーザーに優しい施設運営を目指していきたい。

本研究は、最先端・次世代研究開発支援プログラム、理研社会基盤技術開発プログラム、科研費新学術領域ゲノム支援、東北マリンサイエンス拠点形成事業、総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)、「次世代農林水産業創造技術」(農研機構生研センター委託研究)の支援を受けている。

## 参考文献

- 1) 東京農業大学短期大学部生活科学研究部編、桜さくらサクラ100の素顔、P64、東京農業大学出版会(2000)
- 2) Y.Nishina,D.Moriwaki, Sci.Papers the Ins.Phys.Chem. Res.36, 419(1939)
- 3) H.Y.Lee, T.Kameya, Theor. Appl. Genet., 82, 405(1991)
- 4) 阿部知子、吉田茂男、放射線と産業 71, 63-66(1996)
- 5) 阿部知子、鈴木賢一、農業および園芸 77, 44-50(2002)
- 6) M.Suzuki et.al, Adv. Space Res. 18, 127-136(1996)
- 7) M.Suzuki et.al, Biol. Sci. Space 17, 302-306(2003)
- 8) H. Ryuto et.al, J. Biomed.Nanotech. 2, 88-93(2006)
- 9) Ichida H. et.al, Mutat. Res. 639, 101-107(2008)
- 10) T. Morishita et.al., Nuc.Instr. Met. Phys.Res. B 206, 565-569(2003)
- 11) Y. Kazama et.al, Plant Biotech. 25, 113-117(2008)
- 12) Y. Kazama et.al, BMC Plant. Biol. 11, 161(2011)
- 13) T. Hirano et.al, Mutat. Res. 735, 19-31(2012)
- 14) T. Hirano et.al, Plant J., doi:10.1111/tpj.12793(2015)
- 15) 横堀正敏、阿部知子、ブレインテクノニュース148, 29-33(2011)

## 執筆者略歴



阿部 知子

理化学研究所仁科加速器研究センター応用研究開発室長、生物照射チームリーダー(兼務)。

東北大学大学院農学研究科修了、農学博士。専門は加速器生物学。加速器物理学・

原子物理学・核化学など異分野の研究者の協力を得て、加速器を使った生物学研究を推進するとともに、産業界と連携し重イオンビーム品種改良法の実用化を実現。世界で販売する26種類の植物新品種と、20以上の酒蔵が使用する清酒酵母2種類を作出した。2007年科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞、2009年産学官連携功労者表彰文部科学大臣賞、2013年日本植物学会特別賞を受賞

## 林 依子

理化学研究所仁科加速器研究センター生物照射チームテクニカルスタッフ。

北海道大学大学院獣医学研究科修了、獣医学修士。照射サンプル調整、照射実験スケジュール管理など理研品種改良ユーザー会をサポートし、照射技術の開発にも携わる。

# 「放射線安全科学」徒然草

## － 30年続いた放射線防護研究会の活動に思うこと －



加藤 和明\*

### 1. 温故知新

スマホとパソコンを持ってアナグラに入り“蛸壺生活”をしている若者が目立つ。見聞・思考の(時空)領域が局所的となり、生活様式は“happy-go-lucky”(行き当たりばったり)である。関心領域が狭くなり、特殊な領域や過去に興味を持つのは、特殊な人種(広義の“専門家”)に限られるようになってきた。

最近感じることの一つに、木(樹)を見る名人は少なくないが、森を観る名人は極めて少ない、ということがある。近代社会は分業と専門の特化で成り立っているが、どんな仕事であれ、陰にはそれを支える“学術”の裏付けがあるものであり、また健全な発展には、その学術面での健全な発展も必要となる。昔は、専門とする分野の著作や学術論文を逍遙して深く読み込み、また専門家の集まりである学会等で新たな知見の獲得に努め、特別のテーマについての体系化した解説(総合報告)を書かせてもらうようになって初めて“専門家(の一人)”と見做されたものである。それが、最近では、研究者の業績評価に際して、Review Articlesの方が Original Papersより低く評価されるという。タコツボ生活者がコピペでマガイモノを容易につくれるようになり、しかもトリが先かタマゴが先か分からぬが、作品の品質評価をまっとうに果たせる人材が枯渇しているのでこうなったものと思われる。最近では、

先人の成し遂げた偉業に敬意を払い、ご苦勞や失敗談に耳を傾け、謙虚に自己研鑽に励むという風潮が廃れ、教育勅語で諳(そら)んじた「・・・學ヲ修メ、業ヲ習ヒ、以テ智能ヲ啓發シ徳器ヲ成就シ、・・・、璽祖先ノ遺風ヲ顕彰スルニ足ラン」の教えを知るものは、今や稀有である。

温故知新の重要性を考えさせる事例を、放射線防護の領域から拾ってみる。

①. 放射性汚染管理の基準値として、1958年4月1日に施行となった「放射線障害防止法」の関連法令に取り込まれたものが、今猶使われているが、それを導入した際に使用した(であろう)データと論理は、今では探し出すことが實際上不可能となって居る。法令は何回となく改定され、被曝線量の管理基準は何度か改定されているが、例えば、表面汚染の管理基準については“変更されず”のままなのである。

②. 医学にとって放射線は不可欠な存在である。診断に始まった利用は今日治療に及んでいる。陽子線や重粒子線を利用するがん治療が国内のあちこちに見られるようになり、最近「粒子線治療」の総合報告が書かれた<sup>1)</sup>のだが、たまたまそれを手にして驚いた。1970年の頃「夢の放射線治療法」として脚光を浴びて居た“パイ中間子治療法”についての記述が全くないのである。パイ中間子治療法が期待に副えなかった理由(高価な陽子加速器を必要とする上、pionが2次粒子であることから、

\* Kazuaki KATOH NPO法人 放射線安全フォーラム 理事長 / 高エネルギー物理学研究所 名誉教授 / 弊社アドバイザー



その生産コストが極めて高くなり収率を高めることも容易でないことに加えて、中性子などの制御困難なbackground放射線の排除が困難であること、というのが筆者の理解)まで含めて欲しいところだが、それが無理としても、歴史的事実だけは書き添えて欲しいと心底思ったことである。

③. 最近、我が国における“高エネルギー”加速器建設の歴史を述べた資料に当たって意外なことに気付いた。東北大学が300MeVの電子加速器の建設を始め、1967年頃に完成を見た(加速器というものは関係者が常に性能向上に努めるのが常であり、事前に最高性能を申告して“使用許可”を得ることになっている今日とは違い、昔は、いつを以って完成と見做すかが困難であった)のであるが、“歴史の正史”を意識して書いたと思われる文献<sup>2)</sup>からすっぽりと抜けているのであった。学術会議が政府に勧告して創られた加速器のみに目が向いてしまったのかも知れない。

---

## 2. 「放射線防護研究会」 since 1985

---

(NPO)「放射線安全フォーラム」(RSF: Radiation Safety Forum)は、30年前に創られた有志の勉強会「放射線防護研究会」(略称SS研: StrahlenSchutz研究会)を2007年に発展的に改組したものである。

“継続は力なり”ですね、などとよくいわれるが、継続することを目的にやってきた訳ではない。放射線防護の(真の)専門家を育成する仕組みがこの国に欠けていること、関連する科学や技術の発展と安全についての社会の意識が急速に変化するのに伴って、研究課題が絶えず湧き出してくるので活動に共鳴して下さる方が絶えなかったこと、が背景になって居る。

本稿執筆時の30年前には、新科学都市“つくば”で科学万博が開かれ、8月にはJALのジャンボ旅客機が御巢鷹山に墜落したが、筆者にはつい昨日のごとく感じられる。一方で、

視線を30年先の未来に向けると「特異点問題」の年に当たる。「2045年問題」ともいわれるが、それは、人工頭脳(計算機)の知能が人類全体の持つ知能を超えるという意味での“特異点”が時間軸上でこの年に当たる、というものである<sup>3)</sup>。人工頭脳研究の第一人者といわれる、Google社のレイ・カーツワイルが言いだしたことのようである。特異点到達第1号となるComputerは「A・1」と名付けられているが、Google社では、実際、「A・1」の開発を事業目的に取り込んだといわれている。「A・1」が発明されれば、それが人類最後の発明だということになる!? 一般人の多くは、“世の中のすべてがコンピュータによって決められる”という事の重大さを理解が出来たとしても、また、仮に信憑性の高い予測であると受け取ったとしても、どうせ遠い先のことだからと、軽く聞き流すことであろう。

人類が放射線の存在を知ったのは今から120年前のことであった。30年の4倍である。その知らせがドイツから日本に届いたのはひと月以上経ってのことであったが、それから2か月後にはX線の発生に成功し、その本性解明や利用の研究を始めて居た。明治維新から約30年で日本は放射線の科学・技術の先進国となったのである。そして、それは、1945年から1975年までの、日本にとって不幸であった特別の30年を除き、今日まで続いている。この30年というのは、敗戦により4基のサイクロトロンが破壊・廃棄され、関連の研究を禁じられた1945年から、筑波山の麓でKEKの陽子シンクロトロンが12GeVの陽子ビームを生成し、世界最高の陽子加速器であることを証明した1975年(12月28日)までのことである。

ともあれ、30年という時の流れは、確かに長いといえば長いものである。人生(平均寿命)60年なら半分に相当するし、90年に延びても1/3である。先の戦争直後は日本人の平均寿命は40年余だったが、今は倍の80年余となっている。しかし、寿命に限らず、30年という時間が齎す変化の大きさには驚くことが少なくないのも事実である。

では、どうしてSS研がその活動をかくも長きにわたって続けてこられたのであろうか？

筆者の抽出する主な要因は次の3点である。

(1). 放射線防護に係る国の制度設計と運用に問題が在ること：

上記の制度設計は“原子力の傘”の下に押し込まれているが、原子力を仮にやめたとしても放射線との付き合いをやめることはできない。加えて、設計の目標、対象などの適用限界について感覚麻痺を起している。

手本としたICRPシステムの創出に汗を流した（leadershipを發揮した）人達と日本人には、特質に違いがあり、敗戦直後、“無からの出発”において効率的“technology-transfer”に重きを置いたことからカタチ（form）の取り込みに終わってタマシイ（spirit）が置き去りにされた感がある。

(2). 真の専門家が枯渇し、またそれを育成する仕組みが欠落していること：

分業と専門の特化なしに社会の維持発展は不可能であり、如何なる“仕事”においてもそれを支える“学術の支え”が必要である。

放射線防護は典型的な実学であり、社会の意識や関連の科学・技術の進歩に付随して新しい課題が絶えず芽生えるにも拘わらず、この分野では、基礎を支える学術の発展とその成果を実務にfeed-backする仕組みが欠落している。

真の専門家が払底しており、また専門家が自己研鑽に努めたり本当に必要な研究を行う場が大学等に用意されてこなかった。

(3). 学術としての放射線防護に係る科学・技術の様相は先の世界大戦の前・中・後で、その様相を大きく変えたが、日本は、“原子力の非平和利用”を実質的に全く行ってこなかった世界で唯一の“原子力（平和利用）大国”であること：

ICRPの創出・勧告するシステムに準拠することを国是としてきたが、注意を要するのはICRPのいう“放射線防護”がRadiological Protection、つまり“人の健康についての防護”であり、対象とする放射線は、人工起因で、被曝線量の制御が可能なもの限定している

ということである。

須くシステムというものの性能や有効性は、おかれた前提と現実との“一致度”に依存して決まるものであり、前提の経時変化に合わせてシステムの性能向上に努めない限り経時に伴う性能劣化は避けられない。システムには稼働時の性能監視が不可欠であり、それにはreal timeで機能するfeed-back機構を内蔵させることが強く求められる。

---

### 3. B2P5：慶応151年の初夢

---

未来を予想・予測することは誰にも楽しいことである。その際据える未来の定点は、どういう訳か“30年先”と決まって居る。星一（星製菓・星薬科大学の創立者にしてSF作家星新一の父）が大正7年に30年後の東京を書いた“幻の書”「三十年後」（自家出版：モデルは後藤新平といわれる）が2015年9月に新潮社から限定出版された<sup>4)</sup>し、戦後夢中で読んだ海野十三の未来科学の小説も「三十年後の東京」となって居た。（昭和22年に昭和52年の東京を想像したものであるが、早稲田大学電気工学科を卒業し電気試験所（現産総研）で技師を務めていた佐野昌一が1947年に書いたSFである。後に「三十年後の世界」と改題され、今は青空文庫に入っている）またSFの名画「Back To The Future」は1985年につくられ、30年後の2015年が舞台となっている。

未来といえども間もなくあの“3.11”から5年の節目がやってくる。同じ時間でも過去のそれは未来のそれに比べると遥かに短く感じられると書いたが、放射線防護を生業として来た身にとっては、この時間には格別の思いが密度濃く詰め込まれている。5周年の感慨に耽って、様々のことを反芻していたら次のような夢を見てしまった（未来完了形）。夢の中のことなので、事象の生起順や論理の整合性は滅茶苦茶である。おまけに、あろうことか、この国のCommanderになって居るのであった。“Back to the Past 5years ago”のSFである。

・・・

◇当初アメリカがM9.1と報じた“3.11”の「東日本大震災」はあまりにも巨大で、任期中にこれを迎えたのは宿命であり、対応に全力を尽くすは天命というものであろうと観念した。巨大な地震動や津波の発生は人知の及ばぬもの故“天災”に他ならないが、これまでに採られた安全対策には、顕在化した時には国家・国民が多額の損害を被ることになる“残余のリスク”が付随しており、その対策に至らない部分があったと認めざるを得ないし、事後の対策に不備が目立つので“人災”の要因が極めて大きいものと認めざるを得ない。特に、多くの国民に“原子力は絶対に安全”と思い込ませてしまった状況の中で、TEPCOの1Fが過酷事故を起こしてしまったのには正直“参った”である。

◇国家運営に係る制度の設計や運用は平時を前提としたものが多いので、このような“非常時”には、適用が不適切なものが沢山出てくることは自明である。それで、緊急に閣議を開いて「非常事態宣言」を発し、国の内外にこの国が非常事態に陥ったことを宣言することにした。

◇旧憲法には「戒厳令」の規定があったが、現憲法には「非常事態宣言」に係る規定がないので「法治国家」を標榜する手前、如何なものか、という意見を吐く者も居ったが、「法が残って国が亡びるのでは、元も子もないし、後世の笑いものだ」と言い返した。

◇現行制度の設計や運用において、所管大臣が、己の見識に照らし“適用が有害”と思われるものについては、適用の範囲（時空の領域と対象）を限定してその効力を停止する旨、また、非常事態への対応に際して必要と判断した“新規の取り決めや既存のものをも含めた運用の取り決め”を導入する旨、“命”を発することができるものとする。判断の責任は持ってもらうが、結果の責任はすべて「国家非常事態対策本部長」を務める自分が負うこととする。“命”の発信は、可能な限り関係国務大臣と協議を行い、本部長の了解を得ることを

原則とするが、緊急を要すると判断した時は、事後に承認を受けることも“やむなし”とする。

◇最高裁長官と衆参両院の議長に対して宣言したこと：憲法には、国は国民の生命・健康・財産を守ることを義務付けており、その責任は内閣が負うと定めている。依って、首相を務める自分が先頭に立って災害の復興に当たる所存であるが、憲法には生命・健康・財産のすべてが同時に毀損を受ける可能性があるときの優先順位を定めていない。自分としては“生命の保護”を最優先と考えるが、それは対策の結果について総合的に判断するということであり、生命の個を意味するものではない。

◇TEPCOの社長に伝えたこと：災害が天災であれ人災であれ、安全対策に国がその時点で了としたことに付随する“残余のリスク”が顕在化したものに対しては、原則として、国がすべての責任を負う。災害の克服には、己の見識に照らし、最善を尽くして欲しい。

◇1Fの責任者がTEPCOの社長を通して相談してきたときに答えたこと：例え、有意の放射性を帯びていると思われるものであっても、津波が運び込んだ海水は直ちに海へ戻して宜しい。近隣の国々には自分が出向いて「津波が運んできたものだから海に帰した。後にナニガシカノ放射能を含むものであったことを知ったが、非常時のことなので、チェルノブイリ事故の時に準じ、許して欲しい」と陳謝する。また、作業員の放射線被曝についての緊急時管理基準は、過酷事故は起きないとの前提で平時に定めたものでありこの非常時には適切なものとは思われないので、法令の効力を本部長の名で停止する。

◇閣議で“1F事故起因の放射性物質のfall-outによる環境汚染”への対策が議題となったときの発言：「除染を一律に行うことは求めない」こととする。現行の放射線防護に係る制度設計は原子力の平和利用を開始した時に整備したものであるが、手本にしたICRPのシステムは、自然起因、戦争起因、災害起因の放射線被曝を対象としないものであった。原発の安全対策も過酷事故は起きないことを前提

としていたものである。広島・長崎のときには除染など行うことはしなかった。関係都道府県の長には、環境の放射線・放射能レベルの既存値に照合し、その2倍を超えないものについては特に除染の必要がないものと判断していることを伝え、後は己の見識に基づき可能な限り合理的な対応を採ることを要望する。その際、行動や判断を行った者や根拠(データと論理)の同定が可能となるよう記録を残すことを義務付ける。

◇環境の放射性fall-out汚染への対応策を考える際、分散と集中のそれぞれが内包する問題点をよくよく把握した上で行って欲しい。復興の手段に除染を取り上げる際には、“画一的”な“横並び”は排すべきである。

◇閣議の後の閣僚懇談会で全閣僚に申し渡したこと：須く“規制”というものは、制定・変更・解除の何れにおいても、様々の“利権”を生むものであることを意に止め、これに係る不祥事の発生防止にも十分に心を注ぎ、将来に禍根を残すことのないように。

◇防衛大臣に検討を命じたこと：1Fの原発が水素爆発を起こす可能性が増しているとの報告を受け、自衛隊の所有する大砲等でコンクリートの壁を打ち抜くことを考えたが、この策は時間不足もあり実現しなかった。

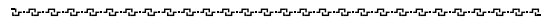
◇法務大臣に検討を命じたこと：1Fで過酷事故の生起阻止や災害規模の抑制に躍起となって居るとき、重要なバルブの操作が、停電のため人力で行わなければならないことになったが、現場が高レベルの放射線場と化したことから急性放射線症の発症阻止を確実に保証することが困難で、現状では作業員に作業を命ずることができない、との報告を受けた。「無事に任務を達成出来たときには、その功に免じて刑を停止し釈放する」ことを約束して死刑囚に志願を募ることを極秘に行って欲しいと命じたが、結果的に実現しなかった。

◇“3.11”の災害規模が大きなものとなった理由の中に、職務の遂行に重大な過失のあることが判明したときには、法の定めによって、その任にあった者を厳正に裁くことを、閣議にお

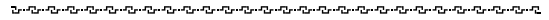
いて、関係各大臣に命じた。

◇文科大臣と学術会議会長を招き要請したこと：自分は“3.11”の災害を、「(鎌倉時代の)元寇(=蒙古襲来)」「1945年の敗戦」に並ぶ「(これまで国が迎えた)三大国難」の一つと捉えている。この国が持っているあらゆる知力を結集・活用してこの国難克服に当たりたい。国の運営が縦割りの制度設計で運用されている弊を乗り越える策を案出し、効あるものとなるよう知恵を絞り実行して欲しい。また、非常事態宣言を解除した後、現行の放射線防護システムを根本から見直し、国として個人や国家のリスク管理を合理的・総合的になし得るものを目指し、可及的速やかに再構築に取り掛って欲しい。それは放射線防護に係る制度設計を“原子力の傘”の下から外し、より上位のものに含めるということである。また、同時に、放射線防護に係る真の専門家育成の仕組みを整えて欲しい。

◇文科大臣、経産大臣、防衛大臣、外務大臣、学術会議会長を呼び、意見を聞き調査を命じあるいは協力を要請したこと：我が国では、放射線防護を“人の健康に係るもの”に限定しているきらいがあるが、ロボットの“健康保持”や“急性放射線症による死亡防止”策を講じるのに有効・有益な情報の収集・整理に至急当たること、同時並行で、(原子力の“非平和利用”)に取り組んできた)海外の原子力先進国に、知見や技能や“道具”などの有無の照会と場合に依じて協力取り付けの交渉を行うこと。



#### 4. 再構築に係る個人的提言



- A. 放射線防護の対象を“人の健康阻害防止”に限定することを止める
- B. 放射線が物体(人体を含む)に及ぼす作用や、それによって誘発される影響(即発性、晩発性の別を問わず)は、発現までの時間や発現の可能性の違いに拘わらず、放射線の出自の違いによるものではないことから、

- 放射線被曝に対する安全対策に使用される「放射線量(Radiation Dose)に、いわゆる“追加線量”を使用することは止める
- C. 放射線防護に係る国の制度設計を“原子力の傘”の下から外し、“国民及び国体”に係るリスクの総合的な低減策を講じるシステムを構築し、原子力に係る安全対策もその下で講じる
- D. 国の指定する「特定放射線源」の使用に係る安全対策は、平時においても、災害発生に伴う非常時においても、確定的影響の発現阻止を目標とする
- E. 放射線に人体を暴露することに伴う確率的影響(stochastic effect)への対処は、環境保全策の一環とし、他のリスク要因の齎すリスクと併せ、総合的に管理(manage)する
- F. 人の受ける放射線被曝を、①. 職業被曝；②. 環境被曝；③. 医療被曝の3種に区分し、①と③については、原則として、“個人被曝線量”の測定・評価に基づき、②については、原則として、空間線量率の測定・評価に基づき、安全管理の方策を構築する。当面、個人被曝線量には“1 cm個人線量当量”、空間線量には“1 cm周辺線量当量”の使用を続けるが、より適切な管理量の探索を並行して行う
- G. 放射線の被曝管理と放射性物質の摂取管理は、現行の、“線量”を介しての統一の方策の構築模索は、feasibilityの上でdemeritがmeritを上回るものであるので取り止めることとし、物質の量を管理の手段・対象に据える
- H. 放射線への被曝や放射性物質摂取に係る“リスクの管理”は、個人や社会の裁量に委ねることを基本原則とするが、それを助成するため、必要な計量は国の認可を得た者(「放射線測定士」)が代行できることとし、放射線の被曝や放射性物質の摂取に係る管理は、Fに掲げた①と③ともに「放射線安全管理士」(国家資格)が助言・助成できるものとする。また、それに必要な情報として、

国は“specific dose”(放射線の単位fluence当たりのリスク)と“specific radioactivity”(単位量の放射性物質摂取が齎すリスク；摂取後の時間に依存)の勧奨値を提供するものとする

- I. 同じく②に掲げた環境放射線に係る安全管理は、実態に応じて、環境省または地方自治体が責任を持ち、必要な措置を講ずるものとする

---

## 5. 結びの言葉

---

RSFの前身「放射線防護研究会」を始めたとき、“ハウシャセンボウゴケンキュウカイ”という日本語の発音の長さと言い難さ・聞きにくさを避けるため「SS研」という略称をつくった。ドイツ語の放射線防護Strahlen-Schutzからとったものであるが、世の中には蒸汽船Steam-Ship、給油所Service-Station、秘密警察Secret-Serviceなど既に沢山の先輩がいた。ドイツの友人からは「SSといえば“ナチスの親衛隊”だ」といわれたし、東京には、“男女の産み分け法Sex-Selection”を研究する“SS研”も現れた。しかし呼びやすくゴロもいいので今もって使われ続けて居る。定年後、“洗練課題(Sophisticated-Subjects)研究所”を創り、たまに書く論文などの所属機関名として使っている。

本稿は、耳目の働きの衰えから、“人生の行き止まり”の近いことを悟った一人の“SS屋”が、若い仕事仲間向けに書き残す覚書である。

(2015年10月12日記)

---

## 参考文献

- 1). RADIOISOTOPES, Vol.61, No.6 (2015).
- 2). 中井浩二：原子核科学の半世紀－廃墟の日本から繁栄の日まで－, 原子核研究, Vol.45, No.1 (1999).
- 3). 松田 卓也：2045年問題 コンピュータが人類を超える日, 廣済堂出版, (2013).
- 4). 星 一(要約・解説:星 新一;監修:星 マリナ):三十年後, 新潮社, (2015).

# 放射線測定器のトレーサビリティと校正について

大洗研究所 放射線標準課 課長 柳田 弘

## はじめに

サーベイメータや個人線量計などの放射線測定器は、病院、原子力発電所、大学、研究所などの放射線を取り扱う事業所において、主に放射線防護の目的で実用量を測定するために使用されていますが、4年前の原子力発電所の事故以来、この事故由来の放射性物質に関係した仕事をされている方々も使用されるようになりました。

これら放射線測定器を使用したことはあるが、どのように校正されているのには知らないという方も多いかと思います。そこで、トレーサビリティや校正事業者の品質システム、施設・設備、校正方法について紹介いたします。

## トレーサビリティ及び品質システム

測定結果に、信頼性、証明能力などが求められる場合、校正された測定器を用いて測定するよう求められるのが普通です。校正は、上位の標準と比較して関係を求め、指示値から測定結果が得られる関係を確立することです。また、測定器を校正することはトレーサビリティが担保されるため、最終的に国家計量標準である国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター(NMIJ)まで測定結果が関連付けられることとなります。ここで、「校正」や「計量計測トレーサビリティ」の用語は、国際計量計測用語VIM3(ISO/IEC Guide99、翻訳作成した標準仕様書TS Z 0032)<sup>1)</sup>に定義されていますので、正確にはこれを参照ください。

さて、計量計測トレーサビリティを考えると、日本には計量法校正事業者登録制度(JCSS)があります。これは、JCSSパンフレットに「IAJapanが運営している認定プログラムの一つであり、計量法に基づいて実施する制度です。」とあります。IAJapanは独立行政法人製品評価技術基盤機構の適合性認定分野を担当している認定センターの呼称です。IAJapanから登録や認定を受けたJCSSの校正事業者は、登録事業者と国際MRA対応認定事業者があり、両者とも、審査を受け登録された手順に従って校正したのに対して、JCSS標章を付して校正証明書を発行できます。更に、国際MRA対応認定事業者は認定国際基準に対応しているため、海外でも広く受け入れられる認定シンボルを付した校正証明書を発行できます。

では、JCSSの量はどれだけの種類があるかということ、JCSS登録の区分は、濃度、長さ、質量など、24区分あります。放射線分野の区分は「放射線・放射能・中性子」で、校正の体系は図1のようになっています。ここで、当社大洗研究所は $\gamma$ 線に関しての国際MRA対応認定事業者となっています。参考までに、登録証と認定証の見本を図2に、認定シンボル付の校正証明書の見本を図3に示します。

品質マネジメントシステム(ISO 9000s)は広く普及し、ほとんどの人が知るところとなりました。対して、JCSSの校正事業者が求められる品質システムは、試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項(ISO/IEC 17025)で、更に計量法関連法規があります。そして、これらに適合しなくては、登録や認

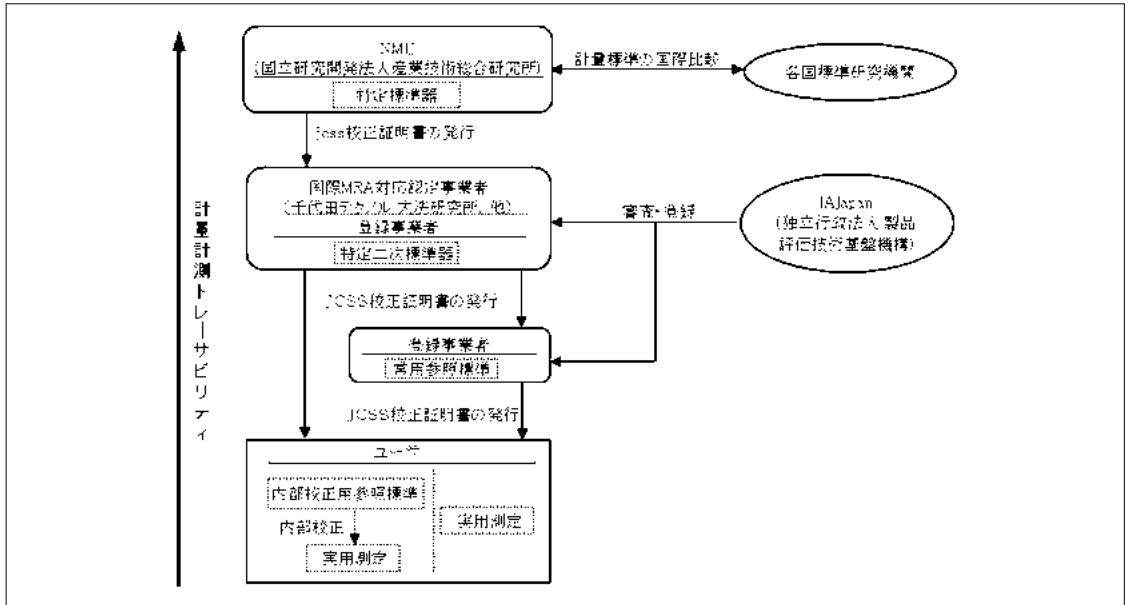


図1 放射線分野におけるJCSS体系



図2 登録証と認定証(当社大洗研究所)



図3 認定シンボル付の校正証明書の見本

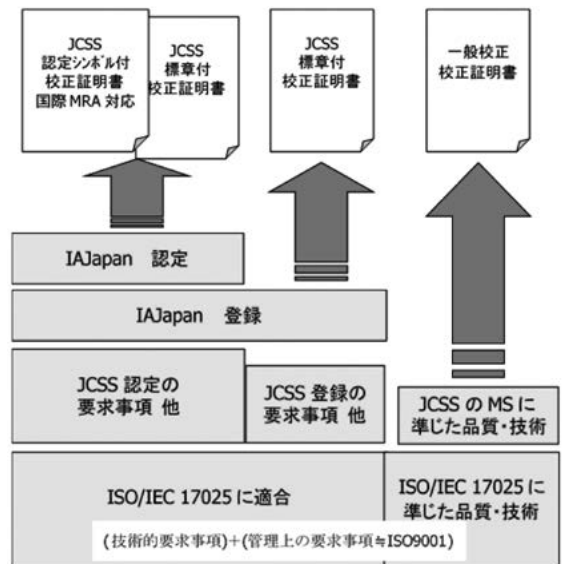


図4 一般的な認定・登録事業者の品質システム (概念図)

定がなされません。このISO/IEC 17025の大枠を紹介すると、技術的要求事項、およびISO 9001で規定しているのとはほぼ同じ管理上の要求事項から構成されています。

また、これらの品質システムを持ち、JCSS校正ではないが、これに類似した一般校正を

実施している校正事業者が多くあります。これら品質システムについて、少し組み合わせが複雑に感じられるかと思いますので、概念を簡単に図4にまとめました。

**放射線測定器について**

\*\*\*\*\*

使用する目的によって扱う放射線測定器が異なるように、放射線測定器の種類によって校正方法も異なります。このため、ここでは放射線場を値付けするような標準器を除いて、放射線防護を目的とした現場で実用に使用する放射線測定器について、その種類をまとめます。

実用に使用する放射線測定器は、その使用目的から大きく分けて次の2種類があります。一つは作業環境などの場の放射線を測ることを目的とした空間線量率用のサーベイメータやエリアモニタ、もう一つは、個人の被ばく

線量を測ることを目的とした個人線量計です。また、これら放射線測定器以外で多く用いられている物品等の表面汚染を測ることを目的とした表面汚染用のサーベイメータについても触れたいと思います。

同じ空間線量率サーベイメータでも、空気カーマ率、1cm線量当量率 [ $\dot{H}^*(10)$ ]、70μ線量当量率 [ $\dot{H}'(0.07)$ ] など、どの線量を測るか、対象とする線種 (X線・γ線, α線, β線, 中性子) は何かにより、その器種が決まります。同様に、個人線量当量は1cm線量当量 [ $H_p(10)$ ]、70μm線量当量 [ $H_p(0.07)$ ] などの線量の種類、対象とする線種により器種が決まります。また、最近話題の3mm線量当量(率) [ $\dot{H}'(3)$ や $H_p(3)$ ] のための測定器もちろほら現れてきました。

少しややこしいかと思しますので、実用に使用する代表的な放射線測定器を、表1にまとめました。

表1 代表的な放射線測定器の種類

空間線量率用 サーベイメータ の一例	$\dot{H}^*(10)$ [X, γ線]  (シンチレーション) (電離箱)	$\dot{H}^*(10), \dot{H}'(0.07)$ [X, γ線, β線]  (電離箱)	$\dot{H}^*(10)$ [中性子]  (比例計数管)
個人線量計 の一例	$H_p(10)$ [X, γ線]  (半導体)	$H_p(10), H_p(0.07)$ [X, γ線, β線]  (半導体)	$H_p(10), H_p(0.07)$ [X, γ線, β線, 中性子]  (蛍光ガラス、個体飛跡)
表面汚染 サーベイメータ の一例	表面汚染密度 [β線]  (GM管)	表面汚染密度 [β線/α線]  (シンチレーション)	



## 施設・設備

\*\*\*\*\*

放射線測定器を校正するには、それなりの施設と装置が必要で、最低でも線源やX線発生装置などの放射線の発生源が必要です。照射装置はγ線用、X線用、β線用、中性子用など、それぞれの放射線の特徴を考慮した設計をしています。これらの例を図5に示します。また、照射装置と校正する放射線測定器とが対比できるようまとめると、概ね表2のようになります。

ここで例に挙げた照射装置はISOやJIS規格に準拠するもので、基準校正が可能なものです。これら以外に、基準校正は出来ないが実用基準測定器との組み合わせで実用校正が可能な実用照射装置もあります。

γ線照射装置について、γ線を一方向に照射できるようコリメートし、放射線測定器を設置する台車が移動して、線源との距離を変えることで線量率を変化させることができる構造のものが多くあります。図5の写真にあるようなコリメート式γ線照射装置の台車は最短で0.5mほどから最長で5～10mほど動くものがあります。また、校正に使用する線源は、ほとんどがCs-137です。

X線照射装置について、γ線照射装置との大きな違いは放射線の発生源が線源ではなく、X線管球ということです。ここでは、構造の説明は省き、校正に必要な実質的な違いを2点説明します。一つは、現在の一般的なX線発生装置のエネルギーは、Cs-137の662keVの半分以下であること（参考までに、ISO 4037-1<sup>2)</sup>における最大のN-300：250keV、最小のN-10：8keV)。二つめは、発生したX線のエネルギーには幅があることです。例えば、N-300の場合は300keVを上限としてこれより低いエネルギーが発生し、平均エネルギーが250keVとなります。ここで

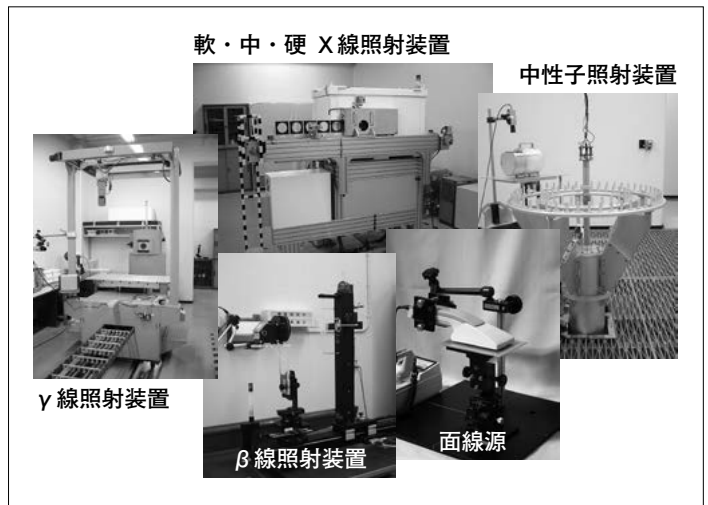


図5 照射装置の例

表2 放射線測定器と使用する照射装置

照射装置	主な放射線測定器（実用）
γ線照射装置	サーベイメータ、 エリアモニタ等 [Ka、H*(10)、H'(0.07)]
軟中硬X線照射装置	個人線量計 [Hp(10)、Hp(0.07)]
β線照射装置	サーベイメータ [H'(0.07)] 個人線量計 [Hp (0.07)]
中性子照射装置	サーベイメータ、 エリアモニタ等 [H*(10)] 個人線量計 [Hp(10)]
面線源	表面汚染用サーベイメータ [β線、又はα線]

\* 表中の [ ] 内の記号は測定対象量で、次の通りです。

Ka：空気カーマ（率）

H\*(10)：周辺線量当量 [1 cm線量当量（率）]

H'(0.07)：方向性線量当量 [70μm線量当量（率）]

Hp(10)、Hp(0.07)：個人線量当量

[1 cm線量当量（率）、

70 μm線量当量（率）]

の“N”は、Narrow spec-trum seriesを意味し、他のシリーズに比べて付加フィルターを厚くすることで低エネルギー成分を多くカットし、スペクトルを狭くしたものです。線質指標

QIで見ると、0.8程度になります。それでも、Cs-137のようなモノピークの $\gamma$ 線とは程遠く幅の広いスペクトルとなります。

$\beta$ 線照射装置について、 $\beta$ 線は電荷を持っているため、光子と比べてかなり飛程が短くなります。従って、X線、 $\gamma$ 線の照射装置のような照射距離をとれず、ほぼ固定で短い距離となります。図5にある写真の $\beta$ 線照射装置の距離は基本的に30cmです。また、校正に用いられる代表的な線源は、Sr-90+Y-90、Kr-85、Pm-147などがあり、JIS Z 4514<sup>3)</sup>では、線源の仕様と、残留最大 $\beta$ 線エネルギー(Eres)の最小値がそれぞれ、1.80MeV、0.53MeV、0.13MeVであるように規定されています。

中性子照射装置について、中性子は散乱が多く発生するため、図5にある写真の中性子照射装置では散乱を極力抑えるために、線源を部屋の中心に位置するようなジオメトリーとし、設置台等の構造材料も散乱発生が比較的少ないアルミニウムを使用しています。また、校正に用いられる代表的な線源は、Am-241+Be、Cf-252などがあり、JIS Z 4521<sup>4)</sup>に規定されています。

面線源については、JIS Z 4334<sup>5)</sup>に国家計量標準が表面放出率を校正したクラス1参照標準線源、クラス1に繋がって校正されたクラス2参照標準線源、及び実用標準線源が規定されています。また、校正対象である表面汚染サーベイメータは、JIS Z 4329<sup>6)</sup>において、試験に用いる $\alpha$ 線源はAm-241、 $\beta$ 線源はCl-36又はTl-204(200keV以下はC-14)、機器効率試験は特に指定の無い限り面線源と検出器表面の距離が5mmと規定されています。

なお、環境省が策定した除染関係ガイドライン(第2版)では、その第1編「汚染状況重点調査地域内における環境の汚染状況の調査測定方法に係るガイドライン」で、GMサーベイメータ(表面汚染密度の測定)について、「原則として測定対象物からおおよそ1cmの高

さを計測します。」とありますので、実用と校正の方法に留意しておきたいところです。

## 校正方法

放射線防護のため、実用に用いる多種多様な放射線測定器は、その使用目的から校正方法が異なります。基本は、空間線量率用測定器(主にサーベイメータ)をフリーインエア、個人線量計をオンファントムで校正を行います。ここで、上記の照射装置の説明でも記載した校正方法のISO、JIS規格等があり国際的に取り決められた基準で行うことが基本となります。これら規格は、 $\gamma$ 線・X線、 $\beta$ 線、中性子と異なる線種毎に校正方法を規定したISOやJISがありますが、ISOについては、これらのベース規格となるISO 29661<sup>7)</sup>があり、線種によらず定義と基本概念が規定されています。

ここでは、一番多く使用されている $\gamma$ 線用空間線量率測定器と、 $\gamma$ 線用個人線量計の校正方法について簡単に紹介いたします。

$\gamma$ 線による基本的な校正としては、平行ビーム、二次電子平衡状態とすることなどが挙げられます。例えば、平行ビームと見なせるために、線源と検出器との距離は検出部寸法の5倍以上(JIS Z 4511<sup>8)</sup>により)とします。また、試験点で二次電子平衡がとれない場合はビルドアッププレート在前面に設置(ISO 4037-3より)するなどがあります。空間線量率用測定器や個人線量計の校正をイメージしたジオメトリーを次図に描きます。

図6-1は、電離箱式やシンチレーション式の空間線量率用測定器[H\*(10)]を校正するイメージで、可能な限り散乱体となるものを除いたジオメトリーを表現しました。図6-2は、電子式やガラスなどの個人線量計[Hp(10), Hp(0.07)]を校正するイメージで、人間の体幹部を模擬したスラブファントム(30×30×15cm)を散乱体となる校正台

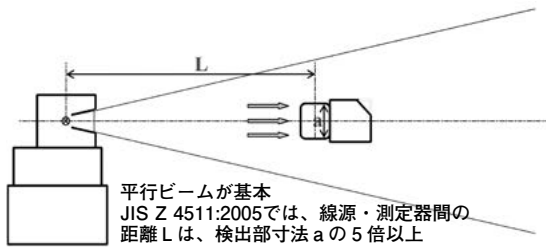


図6-1 フリーインエアーの校正イメージ

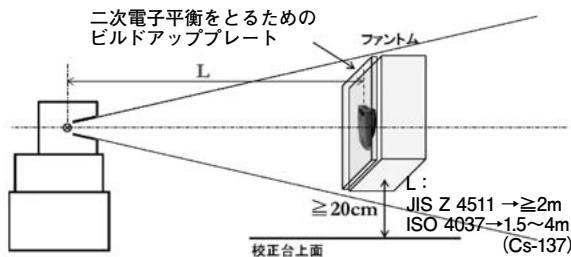


図6-2 オンファントムの校正イメージ

から空気等価物で20cm以上離して設置し、ファントム表面に個人線量計を密着させ、前面にビルドアッププレートを置いたジオメトリを表現しました。このように、空間線量率用測定器と個人線量計の校正方法は、ファントムを用いるか否かが大きく異なります。また、ファントムには、図6-2にイメージした体幹部を模擬したスラブファントムの他に、腕や足を模擬したピラーファントム、指を模擬したロッドファントムなどがISO 4037-3に規定されています。

おわりに

放射線を測定するとき、その使用目的に合った種類、性能の測定器を選択するかと思いますが、それら測定器は皆いろいろな現場で使用するため、校正したときと同じ条件で測定できないことが普通です。従って、使用する放射線測定器の仕様を把握した上で、実際に使用するときの状態や条件が、校正した

時の条件とどのように違うのかを把握することは大切になります。

放射線測定器の仕様について、最近のものは目盛の直線性が良いものが多く、仕様の範囲内では線量率特性や線量特性は気にならないくらい良いものが多くあります。しかし、エネルギー特性、方向特性、温度特性などは、数十%の幅があるものが多く、種々な現場における測定結果に大きく影響を及ぼす可能性があります。

これらの特性の違いは、例えば温度など現場の環境条件が分かれば補正できるものもありますが、分からないものも多くあります。この場合、測定器メーカーの仕様、またはIECやJIS規格に準拠していれば、その範囲で指示値が変化する可能性があることに留意する必要があります。従って、測定器のこれら仕様、特性を確認しておくことが望まれます。

参考文献

- 1) ISO/IEC Guide 99:2007 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)  
TS Z 0032 国際計量計測用語 – 基本及び一般概念並びに関連用語 (VIM)
- 2) ISO 4037-1:1996, ISO 4037-3:1999 X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy
- 3) JIS Z 4514:2010 β線組織吸収線量測定器及び線量当量測定器の校正方法
- 4) JIS Z 4521:2006 中性子線量当量(率)計の校正方法
- 5) JIS Z 4334:2005 放射線表面汚染モニタ校正用線源 – β線放出核種(最大エネルギー0.15MeV以上)及びα線放出核種
- 6) JIS Z 4329:2004 放射性表面汚染サーベイメータ
- 7) ISO 29661:2012 Reference radiation fields for radiation protection – Definitions and fundamental concepts
- 8) JIS Z 4511:2005 照射線量測定器, 空気カーマ測定器, 空気吸収線量測定器及び線量当量測定器の校正方法

サービス部門からのお願い

## 使用者変更のご依頼をされる際は・・・

平素より弊社のモニタリングサービスをご利用くださりまして、誠にありがとうございます。測定センターではお客様から毎日次のようなたくさんの変更のご依頼をお受けしております。

- ・ご使用者の追加
- ・ご使用者の休止（休止期間を指定）
- ・ご使用者の中止
- ・名義変更（別の使用者への変更）

このような変更ご依頼には、**必ず変更年月日のご記入**をお願いいたします。変更年月日が不明ですと、モニタのお届けが遅れる場合もございます。

また、ご使用者の追加・名義変更の際には、**生年月日のご記入**をお願いいたします。個人コードをお持ちのお客様は、個人コードをご記入ください。個人コードをご記入くださった場合には、生年月日のご記入は不要です。



\*[ご使用者変更連絡票]はこちらまで…測定センター フリーダイヤルFAX：0120-506-984

## 編集後記

●新春のお喜びを申しあげます。本年もよろしくお願ひいたします。

福島原子力発電所事故による安全基準の見直しの為、すべての原子力発電所が停止していましたが、平成26年9月原子力規制委員会から九州電力(株)川内原子力発電所の再稼動について新基準に適合との判断を受け、27年8月に1号機、10月に2号機が起動いたしました。他の発電所についても順次再稼動が予定されています。弊社といたしましても個人線量モニタリングサービス、測定機材、防護資材で放射線安全管理に貢献できればと思います。

●新春号にふさわしく、日本人に古くから親しまれている桜(サクラ)について理化学研究所 仁科加速器研究センター 阿部知子様、林依子様にご執筆いただきました。今まで思いもなかったサクラの新品種と加速器のかかわりは大変興味深く、今後、更に素晴らしいサクラを見る事が出来る事を期待しています。

NPO法人 放射線安全フォーラム 理事長 加藤和明様には「放射線安全科学」徒然草」と題して30年続いている放射線防護研究会（現放射線安全フォーラム）の活動および

シンポジウムについて執筆いただきました。30年間の活動に対する想い、3.11に対する想い、これからの放射線防護に対する先生の思いが伝わってきます。これからも放射線防護についてご指導くださる様お願いいたします。

弊社大洗研究所 放射線標準課 柳田から弊社が行っている放射線測定器校正についてのトレーサビリティおよび品質システム体系、放射線測定器の種類、校正方法について紹介させていただきました。品質については測定に限らずいろいろな場面で問題となっております参考にしていただけたらと思います。

●巻頭の弊社代表取締役社長 山口和彦の「迎春のごあいさつ」では、ガラスバッジの累計測定件数5,000万件達成のお礼を述べております。多くの方にガラスバッジをご利用いただいております。これからも弊社の企業理念「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」を基に、皆様にご満足いただける個人線量モニタリングサービスを目指して、更なる改善とサービス向上に努めて参ります。編集委員一同これからもより一層皆様のお役に立つ情報を提供させていただき所存でございます。（畑崎 成昭）

## FBNews No.469

発行日／平成28年1月1日

発行人／山口和彦

編集委員／畑崎成昭 根岸公一郎 中村尚司 金子正人 加藤和明 青山伸 五十嵐仁

加藤毅彦 兼尾昌二 木名瀬一美 篠崎和佳子 高橋英典 谷口和史 長谷川香織

発行所／株式会社千代田テクノロ 線量計測事業本部

所在地／☎113-8681 東京都文京区湯島1-7-12 千代田御茶の水ビル4階

電話／03-3816-5210 FAX／03-5803-4890

<http://www.c-technol.co.jp/>

印刷／株式会社テクノサポートシステム

—禁無断転載— 定価400円(本体371円)