

放射線発生施設における放射線の安全な取り扱い

技術研究所 顧問 中村 尚司
(東北大学 名誉教授)

1. はじめに

放射線を発生するものには、放射性同位元素（放射性物質）、原子炉、加速器があり、我が国では、原子炉は核燃料も含めて「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（以下、原子炉等規制法）」で規制され、放射性同位元素と加速器は、放射性廃棄物も含めて「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（以下、放射線障害防止法）」で規制されている。原子炉には原子力分野を中心とする研究用のものとエネルギーを生産する発電用原子炉とがある。2011年3月の東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故により、現在、8月と10月に運転が始まった川内原子力発電所1,2号機を除いて、研究用も含めたすべての原子炉の運転が停止している。また、この事故に伴って大量の放射性物質が周辺環境中に飛散し、その除染が大きな社会的課題となっている。さらに、事故を起こした原子炉だけでなく運転経歴の長い原子炉を含めた廃炉計画が次々と出され、それに伴って排出される放射性廃棄物の処理・処分も今後大きな社会的問題になる。

これらの放射線発生装置は、研究用の熱出力が数万kW以下の小さい原子炉を除いて、放射線安全という観点からみて原子炉と加速器には大きな違いがある。加速器は発電するものではなくて消費するものなので、停電するとすぐに運転停止し放射線を発生しなくなってしまうのに対して、発電用原子炉は発電する装置であり、運転停止後も核分裂が持続する臨界状態であり、大量の熱と核分裂生成物を生成するので、安全停止までには非常に慎重な管理が要求される。加速器は様々な核反応により放射性物質が発生し、原子炉も核分裂反応により放射性物質が発生するという点では同じであるが、発生する量が大きく違っている。原子力発電所で発生する放射性廃棄物が1基あたり数千トンから数万トンと大量であるのに対し、加速器施設で発生する放射化物はせいぜい数トンといったところである。なお、2012年4月の放射線障害防止法施行令の改正で、加速器施設で発生した放射化物も放射性廃棄物とみなされることになり、原子炉等規制法と同じく、安全上放射性廃棄物として扱う必要がないものを区分するクリアランス制度が導入された。

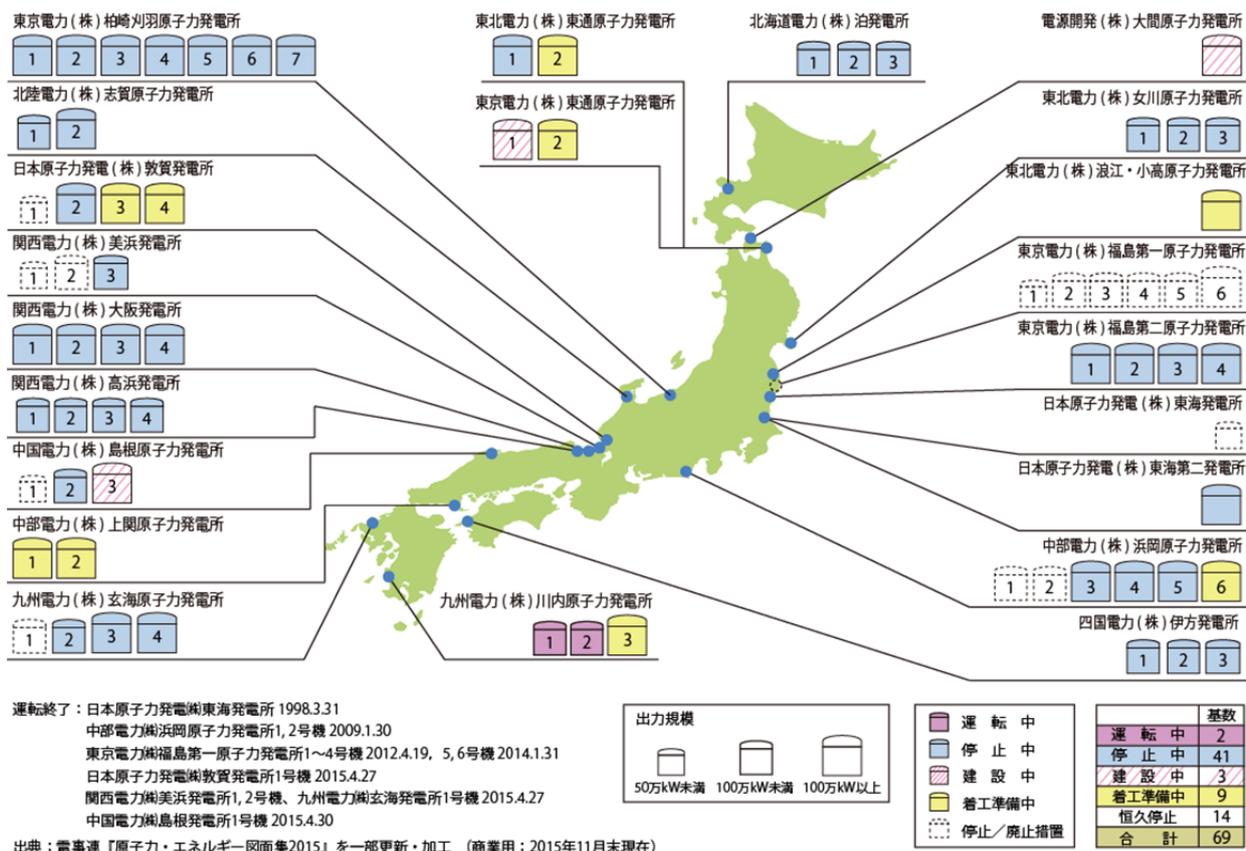


図-1 東日本大震災後の日本の原子力発電所の現状

2. 原子力発電所の現状と除染・廃炉の状況

図-1 に東日本大震災後の我が国の原子力発電所の運転停止等の状況を示す。

現在、九州電力（株）川内原子力発電所 1, 2 号機が運転中であり、原子力規制委員会から運転再開のための安全審査が合格したのが、関西電力（株）高浜発電所 3, 4 号機と四国電力（株）伊方発電所 3 号機となっていて、2016 年春までには伊方発電所 3 号機も再稼働の予定である。また、恒久停止した廃炉予定のものが 14 基となっている。廃炉には 10 から 20 年に及ぶ長い時間が必要になるので、今後廃炉事業が大きなビジネスになると考えられる。廃炉で発生する放射性廃棄物の処理及び管理は、大量かつ長期間に及ぶためコストが高い。この放射性廃棄物は、クリアランス制度に基づく分別を行い、廃棄物量を最小化することが肝要である。そのためには、放射能レベルを精度よく評価する技術が求められる。このニーズに呼応する技術として、原子炉建屋の立体モデルを作成し、コンクリートの放射能汚染濃度をモンテカルロ計算で 3 次元的に高精度に評価することによって、廃炉の費用を 1 割（約 45 億円）低減できることを当社は報道発表している（2015 年 8 月 25 日付日本経済新聞）。これが廃炉に大きく貢献する技術として、ビジネスチャンスに結びつくことを期待している。

福島第一原子力発電所事故に伴う周辺環境の除染に関して、国は基本シナリオを図-2 に示すように ICRP（国際放射線防護委員会）の緊急時被ばく状況と現存被ばく状況に対する放射線による年間被ばく線量の考え方によって決めている。年間 20 mSv 以下になるまで国が主体となって除染し、それ以下では自治体が主体となって長期的に年間 1 mSv 以下になることを目指すシナリオに基づいて、除染ロードマップが作られている。当社は、各自治体が策定したロードマップに従い、福島県広野町、楢葉町、富岡町、大熊町、伊達市、南相馬市などの除染作業や中間貯蔵施設の整備事業に参画している。

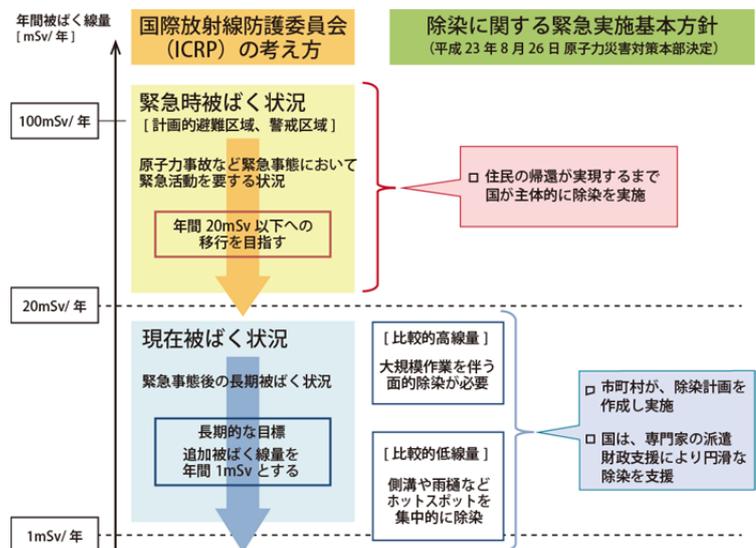


図-2 除染に対する国の基本的シナリオ

3. 加速器施設の現状と放射化物の発生

国内には千数百台の加速器が稼働しているが、そのうち 1 千台近くが病院に設置された 6~20 MeV の加速エネルギーの電子直線加速器（リニアック）であり、放射線治療に使われている。リニアックは、加速して人に照射するビーム電流は大きくないため、放射化物が生成されるのはターゲット周辺に限られている。リニアック以外の医療用の加速器としては、核医学診断に利用される PET（陽電子断層撮影装置）や SPECT（単一光子断層

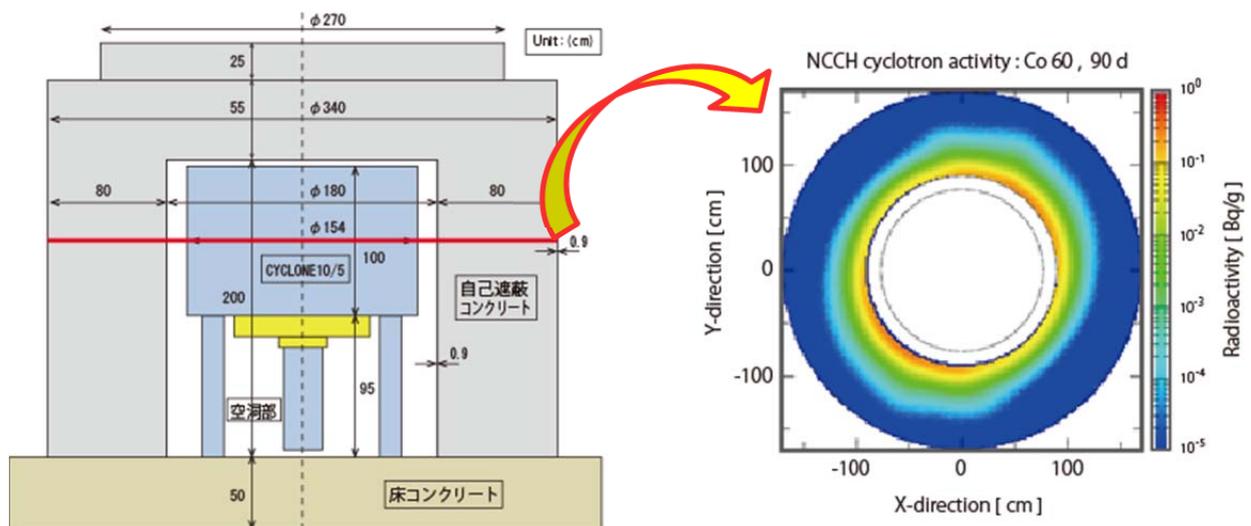


図-3 自己遮蔽型 PET サイクロトロンにおける遮蔽コンクリート中の放射能濃度分布 (⁶⁰Co)

撮影装置)で人体に投与される放射性医薬品を製造するために放射性物質 (PET用の ^{18}F 、 ^{15}O 、 ^{13}N 、 ^{11}C やSPECT用の ^{125}I 、 ^{131}I 、 ^{67}Ga など)を生成する小型サイクロトロンが、2015年6月現在180台余り設置されている。小型サイクロトロンのエネルギーは10~30 MeVと大きくないが、放射性物質を大量に作るために加速粒子である陽子や重陽子の電流量が数十から数百 μA と大きいため、生成される放射化物も多い。ただし、自己遮蔽体付きのサイクロトロンの場合、その外側ではほとんど放射性物質は生成されない。最近これらの施設の廃止が相次いで予定されており、廃止に伴う放射化物の発生とその廃棄物処理が今後の大きな問題と予測される。当社が国立がん研究センター中央病院で行った小型サイクロトロンの廃止に伴う放射化物発生測定と計算による評価(図-3に示す)が、原子力規制庁の放射線規制室で高く評価され、各地の放射線安全管理講習会などでも当社の評価結果が報告されている。これも当社の高い技術によるものである。

また、近年放射線治療用の陽子線と重イオン(炭素イオン)加速器施設が各地で稼働及び計画されている。図-4にその現状を示す。これらの加速器は直接がん細胞に加速した粒子を打ち込んで治療する装置であるため、加速エネルギーは200数十 MeVと高いが、加速粒子のビーム電流量は数 nAと少ない。したがって放射化物の発生もターゲット周辺に限られる。加速器としては、シンクロトロンとサイクロトロンに分けられるが、どちらも人体に様々な方向からビームを打ち込めるように加速ビームを360度回転するための巨大な磁石が付随しているため、病院の施設としては大きい建物になる。この施設の遮蔽設計は、もともと1987年頃から計画され1994年に完成した放射線医学総合研究所のHIMAC(重イオン医学利用加速器)の遮蔽設計の責任者として、筆者が行った計算が世界で初めてのものであり、現在はその成果に基づいて開発されたPHITSモンテカルロコードなどを用いて計算されることが多くなっている。

さらに最近の医療分野では、BNCT(ボロン中性子捕捉療法)という頭頸部がんの治療に効果がある治療法が発展しつつある。これまでは、日本原子力研究開発機構(JAEA)のJRR-4原子炉や京都大学原子炉実験所の研究用原子炉(以下、京大原子炉)の熱中性子場を用いた治療が行われてきたが、原子炉は病院での設置が困難なことから、加速器を用いたBNCTが計画され、現在京大原子炉では30 MeVの1 mA陽子ビームを用いた治療が行われている。この他に、南東北病院(福島県郡山市)でも同じ計画が進んでおり、筑波大学や国立がん研究センターでも進行中で、京都府立医科大学などにも計画がある。BNCTは大量の中性子(熱及び熱外中性子)ビームが治療に必要なため、加速粒子の電流が数 mAから数10 mAと大きく、放射化物の発生評価が重要な課題になる。これに関しても、当社の高い技術が活かされると考えている。

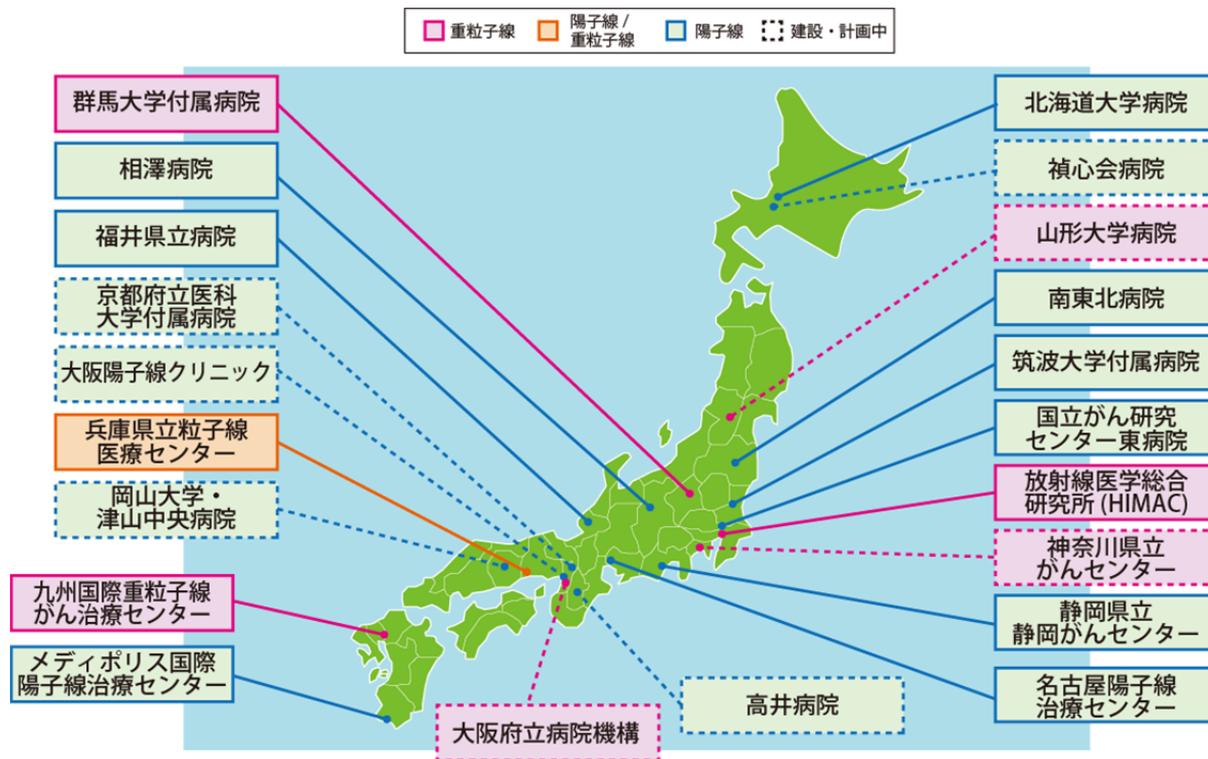


図-4 放射線治療用の陽子および重イオン(炭素イオン)加速器施設

医療用以外の研究用や工業用の数10 MeV から GeV 領域に至る高エネルギー加速器として図-5 にその例を示した。この他にも放射光施設として、愛知県岡崎市の自然科学研究機構分子科学研究所、名古屋大学、立命館大学、広島大学、佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター(佐賀県鳥栖市)に数百 MeV から GeV に至る電子線加速器と電子貯蔵リングを持つ施設がある。他にも東北地方で放射光施設の計画が進んでいる。放射光施設は、電子を加速してその軌道を曲げることによって放射光(紫外線領域から X 線領域の放射線)を放出する装置なので、放射化物はほとんど発生しない。

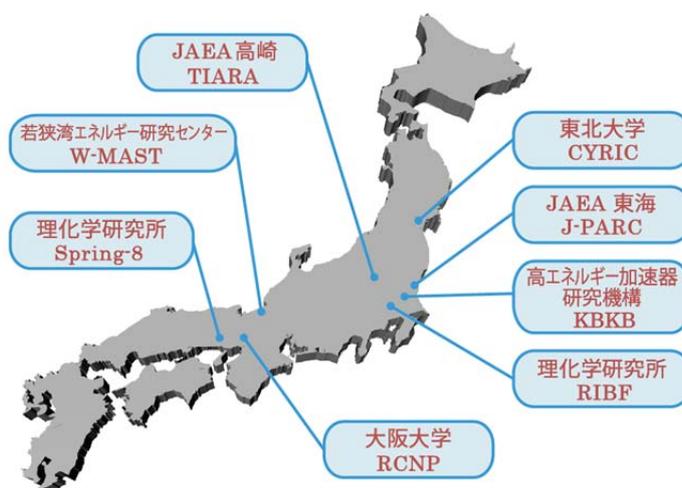


図-5 先端研究用高エネルギー加速器施設

放射化物に関しては、クリアランス制度との関係で国による検認などを含む厳格な手続きが必要

である。しかし、病院を含む小型加速器施設などでは、放射化物の評価や分別への対応が困難である。このため、放射化物とそうでないものを測定や計算により評価し分別することにより、放射性廃棄物を減らすための簡便な評価法を確立する取組みが始まっている。これにも当社の高精度な解析評価技術が大いに役立つと思われる。

国内では、ILC(国際リニアコライダー)計画もあり、これからも加速器は様々な目的に利用されていくので、その動向に留意しておくことが肝要である。

4. おわりに

以上述べてきたように、放射線発生施設の建設は、特に医療分野を中心に今後も増えることが予想されるため、施設建設に当たっての遮蔽安全設計が重要になる。また、原子力発電所の廃炉と廃棄物処理、加速器施設の廃止に伴う放射化物の安全管理などのバックエンド対応技術が、これからの重要な研究開発課題になるとと思われる。これらの課題はいずれも物質中での放射線の挙動を扱う研究分野であり、この課題に関して既に大きな実績を有する当社の技術能力をさらに向上させて、積極的に取り組んで行くことが必要と考えている。

略歴

- 1964年 9月 京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻 修士課程修了
- 1964年 10月 京都大学工学部助手
- 1970年 5月 京都大学工学博士
- 1973年 4月 スウェーデン王国原子力研究所客員研究員(1974年3月まで)
- 1975年 3月 東京大学原子核研究所助教授
- 1986年 7月 東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター教授
- 1987年 4月 宇宙科学研究所併任教授(1990年3月まで)
- 1998年 4月 放射線医学総合研究所客員研究員(2010年3月まで)
- 1999年 4月 日本原子力研究所第1種客員研究員(2009年3月まで)
- 1999年 10月 東北大学大学院工学研究科教授(サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター兼任)
- 2003年 3月 東北大学定年退官
- 2003年 4月 東北大学名誉教授
清水建設株式会社技術研究所顧問

【主な委員会等公的活動歴】

- ・文部科学省放射線審議会会長
- ・大学等放射線施設協議会会長
- ・IEC 国際電気標準会議 TC45 プロジェクトリーダー
- ・ISO 国際標準機構 TC85/SC2 国内委員会委員長 他多数