



大型加速器施設における内部被ばく線量評価用  
パラメータの検討及び線量評価法への適用

Examination and Application of Parameters for Evaluating Internal Dose  
at High-Energy Accelerator Facilities, J-PARC

横山 須美

Sumi YOKOYAMA

原子力基礎工学研究部門  
放射線防護研究グループ

Research Group for Radiation Protection  
Nuclear Science and Engineering Directorate

June 2008

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

大型加速器施設における内部被ばく線量評価用パラメータの検討及び  
線量評価法への適用

日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究部門  
環境・放射線工学ユニット  
横山 須美

(2008年3月31日)

大型加速器施設では、1次粒子及び2次粒子と施設内の構造物や空気との核破砕反応等により、さまざまな放射性核種が生成される。これらを吸入摂取した場合の内部被ばくを防護または線量を実際的かつ合理的に評価するためには、吸入摂取される前の空気中での生成核種の性状（粒径分布や化学形）に関する知見が必要になる。

そこで、これまでに実施されてきた加速器施設で生成される浮遊性放射性核種の性状、特に、重要なファクタとなると考えられる、放射性粒子の粒径分布と放射性ガスの性状に関する研究をとりまとめるとともに、近々利用が開始される J-PARC 等の大型加速器施設において、これらの研究成果を踏まえて線量評価を行った場合、評価結果にどのような影響を及ぼすかについて検討を行った。

Examination and Application of Parameters for Evaluating Internal Dose  
at High-Energy Accelerator Facilities, J-PARC

Sumi YOKOYAMA

Division of Environment and Radiation Sciences  
Nuclear Science and Engineering Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

( Received March 31, 2008 )

At high-energy accelerator facilities, various radionuclides were formed by irradiation of primary and secondary high-energy proton beams. To estimate internal dose suitably and avoid excessive internal radiation protection, it is important to get information on the physicochemical properties of airborne radionuclides such as the particle size distribution of radioactive aerosols and chemical form of radioactive gases in the air of the facilities.

In this report, the study related to internal dose assessment is summarized and the effect on a dose when these results were applied to the dose estimation at the high-energy accelerator facility such as J-PARC facilities is discussed.

Keywords: J-PARC, High-Energy Accelerator Facilities, Internal Dose, Airborne Radionuclide,  
Physicochemical Properties, Radioactive Aerosols, Radioactive Gas, Particle Size Distribution,  
Chemical Form

目次

1.	はじめに.....	1
2.	大型加速器施設で生成される放射性核種と生成量.....	2
2.1	ターゲットや周辺機器及び構造物の放射化により生成される核種.....	2
2.2	冷却水及び土壌中に生成される核種.....	3
2.3	空気の放射化により生成される放射性核種.....	3
2.4	J-PARC 等大型加速器施設における作業者の内部被ばく源となる放射性核種.....	4
3.	内部被ばく防護及び線量評価上の課題.....	5
3.1	化学形.....	5
3.2	粒径分布.....	6
4	J-PARC 等大型加速器施設における内部被ばく線量評価法に関する研究現状.....	7
4.1	生成核種同定及び生成量に関する研究.....	7
4.2	放射性ガスに関する研究.....	7
4.2.1	$^3\text{H}$ に関する研究.....	7
4.2.2	$^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ 及び $^{15}\text{O}$ に関する研究.....	8
4.2.3	$^{38}\text{S}$ , $^{38}\text{Cl}$ 及び $^{39}\text{Cl}$ に関する研究.....	9
4.3	放射性粒子に関する研究.....	9
4.3.1	放射性粒子の生成機構.....	9
4.3.2	加速器施設で生成される放射性粒子の粒径分布.....	11
4.3.3	非放射性ガスの化学形及び生成量.....	12
5.	J-PARC 等大型加速器施設における内部被ばく線量評価への適用.....	14
5.1	放射性ガスの線量評価.....	14
5.1.1	Ar, Kr 及び Xe.....	14
5.1.2	$^3\text{H}$ .....	14
5.1.3	$^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ 及び $^{15}\text{O}$ .....	14
5.1.4	$^{38}\text{S}$ , $^{38}\text{Cl}$ 及び $^{39}\text{Cl}$ .....	15
5.2	放射性粒子に対する線量評価.....	15
5.3	測定手法.....	16
5.3.1	粒子の捕集・測定.....	16
5.3.2	ガスの捕集・測定.....	17
5.4	今後の課題.....	17
6.	まとめ.....	19
	謝辞.....	19
	参考文献.....	20

## Contents

1.	Introduction.....	1
2.	Radionuclide Formed at High-Energy Accelerator Facilities.....	2
2.1	Activation of Equipments.....	2
2.2	Activation of Cooling Water and Soil.....	3
2.3	Air Activation.....	3
2.4	Source of Internal Exposure at J-PARC.....	4
3.	Important Issue of Internal Dose Assessment at High-energy Accelerator Facilities.....	5
3.1	Chemical Form of Radionuclides Formed at the Facilities.....	5
3.2	Particle Size of Radioactive Aerosols.....	6
4.	Study of Internal Dose Assessment at High-energy Accelerator Facilities.....	7
4.1	Study of Radioactive nuclides.....	7
4.2	Study of Radioactive Gases.....	7
4.2.1	$^3\text{H}$ .....	7
4.2.2	$^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ and $^{15}\text{O}$ .....	8
4.2.3	$^{38}\text{S}$ , $^{38}\text{Cl}$ and $^{39}\text{Cl}$ .....	9
4.3.	Study of Radioactive Aerosols.....	9
4.3.1	Formation Mechanism of Radioactive Aerosols.....	9
4.3.2	Particle Size Distribution of Radioactive Aerosols.....	11
4.3.3	Non-Radioactive Gases.....	12
5.	Application to Internal Dose Assessment at J-PARC.....	14
5.1	Dose Assessment for Radioactive Gases.....	14
5.1.1	Ar, Kr and Xe.....	14
5.1.2	$^3\text{H}$ .....	14
5.1.3	$^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ and $^{15}\text{O}$ .....	14
5.1.4	$^{38}\text{S}$ , $^{38}\text{Cl}$ and $^{39}\text{Cl}$ .....	15
5.2	Dose Assessment for Radioactive Aerosols.....	15
5.3	Measurement Methods of Radioactive Aerosols and Gases.....	16
5.3.1	Measurement Methods of Radioactive Gases.....	16
5.3.2	Measurement Methods of Radioactive Gases.....	17
5.4	Future Issue of Internal Dosimetry.....	17
6.	Summary.....	19
	Acknowledgement.....	19
	References.....	20

## 1. はじめに

近年、核物理、生物機構解明、構造解析等の広い分野で、加速器の利用が期待されている。特に、これらの解明においては、より大強度かつ高エネルギービームの利用が注目されている。このような流れの中で、英国のラザフォードアップルトン研究所の中性子及びミュオン発生源をもつ ISIS 加速器、米国の SNS (Spallation Neutron Source) 計画が進められており、近々施設の利用が開始される<sup>1, 2)</sup>。わが国では、すでに運転を終了した高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 12GeV 陽子シンクロトロンをはじめ、大型放射光施設 (SPring-8) 等の大型加速器が数多く運転されてきた。そして、近年になって、ISIS や SNS とともに世界 3 大型加速器のひとつとなる大強度陽子加速施設 (J-PARC) が、KEK と日本原子力研究開発機構 (原子力機構) との両者によって提案された。

J-PARC は、400MeV 常伝導リニアック、400MeV から 600MeV までの超伝導リニアック、3GeV、333 $\mu$ A (1MW) の陽子シンクロトロン (PS) 及び 50GeV、15 $\mu$ A (0.75MW) の陽子シンクロトロン (PS) の加速器群から構成されている<sup>3, 4)</sup>。これらの加速器群において加速したビームは、物質・生命科学実験施設、原子核・素粒子実験施設、核変換実験施設において利用される。2001 年に建設が着手されて以来、2005 年にはリニアック施設及び 3GeV シンクロトロン施設が完成、現在は 50GeV シンクロトロン施設及び物質生命実験施設が完成し、リニアックからのビーム受け入れの準備が整いつつある。そして、2008 年には第 1 期工事が完成し、施設に本格的にビームが供給される予定である<sup>5)</sup>。

このような J-PARC 施設においては、加速されたビームが各施設に振り分けられ、ターゲットに到達するまでにビームロスは避けられない。また、ターゲットへのビームの入射により、1 次ビームまたは 1 次ビームとの相互作用により発生する中性子、陽子、 $\mu$  粒子、 $\pi$  中間子などにより、ターゲットやビームライン周辺機器、冷却水、ビームライン周辺の空気等、様々な物が放射化される<sup>6-13)</sup>。これらの J-PARC 施設において発生する放射化物に対する施設の安全性については、放射化物の生成量の評価や遮へい等の事前評価が行われ、十分安全側になるよう施設が設計され、建設が進められてきた。また、施設の適正な管理が実施されるように、施設で発生する放射線及び放射化物を監視するための測定器の検討がなされてきた<sup>12)</sup>。

しかし、正確な線量評価や合理的かつ適切な防護を行うためには、施設特有のより詳細な情報が必要となる。特に、内部被ばく線量を評価するためには、吸入時の放射性物質の核種や空气中濃度だけでなく、その性状が体内での動態を決定することから重要となる。しかし、これらの詳細な知見は諸外国においても調べられておらず、わが国でも 1980 年代までは十分な知見がなかった。その後、KEK や日本原子力研究所 (現在、日本原子力研究開発機構) によりその重要性が着目され、これらの機関において加速器施設における内部被ばく線量評価に関するさまざまな研究が実施されてきた。そこで、まもなく J-PARC の施設供用が開始されることから、得られた知見を整理し、これらの知見を用いることにより、加速器施設での内部被ばくを合理的かつ適切に防護または線量を正確に評価するための方法について取りまとめるとともに、得られた成果を線量評価に適用した場合の評価結果への影響について述べる。

## 2. 大型加速器施設で生成される放射性核種と生成量

大型加速器施設においては、ターゲットへの高エネルギー陽子の入射、ビーム加速中及び各施設へのビーム輸送中のビーム損失によるビームライン周辺での2次粒子の発生等で周辺構造物、冷却水、施設内空気等に放射性核種が生成される。その一部は、機器からの漏えいや空気中で核種が生成されること等により、施設内空気中の放射性物質濃度を上昇させる。このような施設内にビーム調整や保守点検のため、人が入室し、作業を行う場合、放射化した周辺構造物からの外部被ばくだけでなく、空气中に浮遊する放射性核種を吸入することにより、内部被ばくが発生する。この内部被ばく発生源及び生成放射性核種としては、以下のようなものが考えられる。

### 2.1 ターゲットや周辺機器及び構造物の放射化により生成される核種

J-PARCでは、核破砕中性子源として水銀、鉛ビスマスといったこれまでの原子力施設で使用されている構造物とは異なる材質をターゲットとして使用する。これらに高エネルギー陽子ビームが入射することにより、さまざまな放射性核種が生成される<sup>9-13)</sup>。

物質・生命科学実験施設では、炭素ターゲットや水銀ターゲットに1MW、3GeV陽子ビームが導入されるため、これらが放射化されるとともに、ビーム加速中のビームロスにより、スクレーパー、電磁石、ターゲット容器、陽子入射窓、モデレーター等が放射化される。このようなターゲットや周辺構造物を構成する物質から生成される核種は物質の質量数とほとんど変わらない比較的大きな質量を持つものから、蒸発過程で生成されるトリチウムのような軽い核種まで生成される。計算によると水銀ターゲット中に生成される核種数は、生成後に直ちに消滅してしまう半減期が $\mu\text{s}$ オーダーの短半減期核種も含めて約2000種類であるといわれている。その主な生成核種には以下のようなものがある<sup>9)</sup>。ターゲット容器の主成分であるステンレスやアルミ合金中には、 $^7\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{24}\text{Na}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{56}\text{Mn}$ 、 $^{56}\text{Co}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{100\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 等が生成される。冷却水中には、 $^3\text{H}$ や $^7\text{Be}$ 等が多く生成される。また、中性子発生源として使用される水銀と入射粒子との核破砕反応では、 $^3\text{H}$ のような軽い核種、 $^{37}\text{Ar}$ 、 $^{42}\text{Ar}$ 、 $^{81}\text{Kr}$ 、 $^{83\text{m}}\text{Kr}$ 、 $^{85}\text{Kr}$ 、 $^{122}\text{Xe}$ 、 $^{125}\text{Xe}$ 、 $^{122}\text{I}$ 、 $^{123}\text{I}$ 、 $^{124}\text{I}$ 、 $^{125}\text{I}$ 、 $^{131}\text{I}$ のような気体として存在しやすい核種、 $^{197}\text{Au}$ 、 $^{198}\text{Au}$ 、 $^{199}\text{Au}$ 、 $^{197}\text{Hg}$ 、 $^{203}\text{Hg}$ 、 $^{198}\text{Au}$ 、 $^{199}\text{Au}$ 、 $^{193}\text{Pt}$ 等が生成される。このうち、水銀中に生成される核種としては、Hgの放射性同位体生成量が最も多く約14g、次いでPtの放射性同位体が12gとなり、Hの放射性同位体( $^3\text{H}$ )の生成も比較的多く、約9gと推定されている。このうち、 $^{37}\text{Ar}$ 、 $^{42}\text{Ar}$ 、 $^{81}\text{Kr}$ 、 $^{83\text{m}}\text{Kr}$ 、 $^{85}\text{Kr}$ 、 $^{122}\text{Xe}$ 、 $^{125}\text{Xe}$ は、水銀を循環している間に水銀から気相中へ移行し、ターゲット循環系のサージタンク内に蓄積されると考えられている。

核変換実験施設では、ターゲットの構成物質として、鉛-ビスマスが使用される予定である。ターゲット中に生成される核種には、質量数が190以上のものが支配的になるといわれている<sup>12)</sup>。このうち、 $^{207}\text{Bi}$ 、 $^{194}\text{Hg}$ 、 $^{202}\text{Pb}$ 等は、長寿命核種である。試算では、1.5GeVの陽子を、25mAで600日間照射した場合、運転後5年間では $\alpha$ 線放出核種である $^{210}\text{Po}$ (半減期138d)の生成量が多くなることが報告されている。また、 $^{208}\text{Po}$ 、 $^{209}\text{Po}$ も $^{210}\text{Po}$ と同程度生成される。Poは $\alpha$ 線放出核種であるとともに、気相に放出されやすいといった特徴がある。一方、運転停止後20年間では、 $^{55}\text{Fe}$ (半減期2.7y)が最も支配的となる。このほかにも、生成量は少ないが $^{39}\text{Ar}$ 、 $^{125}\text{I}$ といった気相中に放出されやすい核種がターゲット内に生成される。



ビーム輸送中にはビームの漏えいが起こる。この漏えいにより発生する高エネルギー陽子、中性子とビームライン構造物との核破砕反応等により、ビームライン構造物や周辺構造物が放射化される。J-PARCで仮定されているビーム損失量は、KEKと同程度であると考えられている。KEKでは、ビーム損失に比例して、ビームダクト表面や床面に ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^{22}\text{Na}$ 、 ${}^{24}\text{Na}$ 、 ${}^{51}\text{Cr}$ 、 ${}^{54}\text{Mn}$ の表面汚染が発生することが報告されている<sup>14, 15)</sup>。この他、遮へい用のコンクリートも、高エネルギーの1次及び2次粒子や熱中性子にさらされることにより放射化する。その主な生成核種には、 ${}^3\text{H}$ 、 ${}^{22}\text{Na}$ 、 ${}^{54}\text{Mn}$ 、 ${}^{60}\text{Co}$ 、 ${}^{152}\text{Eu}$ がある<sup>16)</sup>。周辺機器やコンクリート内部に生成された核種は、そのほとんどが固体内部に閉じ込められる。しかし、村松らの測定結果によると、KEKのEP2ビームトンネル内のこれらの放射性核種の空气中濃度は、 ${}^{11}\text{C}$ 、 ${}^{13}\text{N}$ 、 ${}^{15}\text{O}$ と比べると4桁以上低いものの、 ${}^3\text{H}$ が $6 \times 10^{-5} \text{ Bq/cm}^3$ 、 ${}^{22}\text{Na}$ 、 ${}^{54}\text{Mn}$ 、 ${}^{56}\text{Co}$ 、 ${}^{56}\text{Ni}$ 等が $10^{-9}$ から $10^{-7} \text{ Bq/cm}^3$ とわずかではあるが検出されている。 ${}^{22}\text{Na}$ 、 ${}^{54}\text{Mn}$ 、 ${}^{56}\text{Co}$ 、 ${}^{56}\text{Ni}$ は、構造物の表面がはく離して空气中に浮遊したものであり、 ${}^3\text{H}$ は、気体として拡散しやすい核種であることから、構造物の表面からわずかに施設内空气中に放出されたものと考えられる<sup>17)</sup>。J-PARCにおいてもKEKのビームトンネル内と同様に、このような構造物中に生成される核種が空气中に浮遊する可能性がある。

## 2.2 冷却水及び土壌中に生成される核種

電磁石用の冷却水が2次粒子にさらされると、 ${}^3\text{H}$ や ${}^7\text{Be}$ が生成される。また、冷却管の放射化により生成された ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^{22}\text{Na}$ 、 ${}^{54}\text{Mn}$ 、 ${}^{58}\text{Co}$ 等の一部が冷却管に溶出する<sup>4, 18)</sup>。KEKでは、冷却回路中にイオン交換樹脂を設置して、 ${}^3\text{H}$ 以外の溶出した核種等を除去することとなっている。このため、これらの核種は環境中に放出されない。一方、 ${}^3\text{H}$ は水(HTO)として存在するため回収できない。 ${}^3\text{H}$ を含有した水は、他の排水により希釈されるとして、冷却水中 ${}^3\text{H}$ 濃度が6から $10 \text{ Bq cm}^3$ になるごとに交換が行われている。J-PARCでは、冷却水の取扱量がKEKの加速器施設よりも多いため、その排水方法については個別に検討されているが、基本的にはKEKと同様に扱われることとなっている<sup>18)</sup>。

KEKでは ${}^3\text{H}$ 、 ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^{22}\text{Na}$ 、 ${}^{54}\text{Mn}$ 、 ${}^{152}\text{Eu}$ 等が、土壌や地下水の放射化より生成されることが報告されているが、KEKの周辺環境水からは、天然放射性核種以外の核種は検出されていない<sup>18)</sup>。J-PARCにおいても、これらの核種が生成され、このうち ${}^3\text{H}$ は冷却水や土壌から、地下水中や環境中へ移行する可能性がある。このため、これらの核種に対する環境中での挙動の把握や濃度の監視が必要となる。

## 2.3 空気の放射化により生成される放射性核種

ビーム輸送中に起こるビームロスにより、ビームライン構造物や周辺構造物、冷却水が放射化される。また、2次粒子の発生にともない、空気も放射化される。J-PARC設計報告書では、遮へい設計のため、最大出力1 MW時にビームトンネル内空气中に生成される放射化物の濃度が算出されている<sup>4)</sup>。報告書には、主要な核種として、 ${}^3\text{H}$ 、 ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^{11}\text{C}$ 、 ${}^{13}\text{N}$ 、 ${}^{14}\text{C}$ 、 ${}^{15}\text{O}$ 、 ${}^{37}\text{Ar}$ 、 ${}^{41}\text{Ar}$ の計算結果が示されている。20日間連続運転した場合、その直後のLinacビームトンネル内空气中には、 ${}^{13}\text{N}$ の生成率が高く、空气中濃度は $\sim 10^{-1} \text{ Bq cm}^3$ となる。なお、計算では、 ${}^7\text{Be}$ は99%がフィルタで除去されることとしている。そして、加速器停止から数時間後には、 ${}^{41}\text{Ar}$ が排気上最も重要な核種となる。数日後には初期空气中濃度が $10^{-4} \text{ Bq cm}^3$ であった半減期の長い ${}^3\text{H}$ 、 ${}^{14}\text{C}$ が空气中に占める割合が高くなる。3 GeV、1 kW

シンクロトロントンネル内空気中では Linac に比べ、各核種の生成量は 2 桁高くなると予想されているが、空気中に生成される放射性核種が空気中に占める割合については、同様な傾向を示すと考えられている。

## 2.4 J-PARC 等大型加速器施設における作業者の内部被ばく源となる放射性核種

上述したように、加速器施設内においては、多種多様な核種が生成される。このうち、施設内空気を吸入した場合の内部被ばく防護対策や線量評価において重要となるのは、気体になりやすい核種や空気に粒子として浮遊しやすい核種である。KEK の加速器施設内の空気測定結果や J-PARC 設計計画書に示された生成核種のうち、水銀ターゲット内に生成される  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{37}\text{Ar}$ ,  $^{42}\text{Ar}$ ,  $^{81}\text{Kr}$ ,  $^{83\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{122}\text{Xe}$ ,  $^{125}\text{Xe}$ ,  $^{122}\text{I}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{124}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{197}\text{Hg}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ , 鉛ビスマスタターゲット中に生成される  $^{210}\text{Po}$  等が浮遊性放射性核種となりうる<sup>9,13)</sup>。水銀ターゲット中に生成された浮遊性核種は、ターゲットへビームが輸送されている間、サージタンク内に蓄積される。ターゲット容器交換時には、これらの放射性物質を排気設備に移してからターゲット容器を開封する。気体廃棄設備に貯蔵された浮遊性放射性核種は、そこで減衰させ、規定の排気濃度を下回ってから、粒子状の放射性物質や Hg の放射性同位体及び  $^3\text{H}$  をフィルタや捕集剤により除去して、スタックから大気へ放出することとなっている。ターゲット容器の交換は、遠隔作業によってホットセル内で実施されることから、作業者がターゲット容器交換作業時に直接ターゲット内に生成された放射性核種を吸入することはないと考えられる。しかし、循環系の装置からのわずかな漏えい等により、蒸気やガスとして拡散しやすい、 $^3\text{H}$ ,  $^{37}\text{Ar}$ ,  $^{42}\text{Ar}$ ,  $^{81}\text{Kr}$ ,  $^{83\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{122}\text{Xe}$ ,  $^{125}\text{Xe}$  が、これらの物質が加速器施設内空気中に放出される可能性がある。

ビームトンネル内の空気の放射化により生成される核種の場合、 $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{37}\text{Ar}$ ,  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{38}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{Cl}$  や周辺構造物の表面からはく離した  $^7\text{Be}$ ,  $^{24}\text{Na}$  等が空気中に浮遊しやすい核種となる<sup>19)</sup>。ビームトンネル内で作業を行う場合、作業者は、このような空気中に生成、浮遊する放射性核種を直接吸入するおそれがある。

### 3. 内部被ばく防護及び線量評価上の課題

現行法令では、被ばく線量は、国際放射線防護委員会（ICRP）の考え方にに基づき、評価することとなっている。作業者の内部被ばく実効線量の算定には、ICRP Publication 68（Publ. 68）等に示された化学形ごとの線量係数（単位摂取量当たりの実効線量， $\text{Sv Bq}^{-1}$ ）を用いる<sup>20,21)</sup>。また、不活性ガス、可溶性または反応性の放射性ガスについては、別途 ICRP Publ. 68 等に値が示されており、これを使用して線量を算定する。この線量係数は、ICRP Publication 66（Publ. 66）の呼吸気道モデル及び ICRP Publ. 30 以降に導入された体内動態モデルを使用して計算される<sup>22)</sup>。作業者の被ばく線量評価を行う場合には、Publ. 68 において、空気力学的放射能中央径（AMAD） $5\mu\text{m}$  に対する線量係数がデフォルト値として与えられている。この他に、施設を設計する場合の基準として、空气中濃度限度、排気中濃度限度及び排水中濃度限度が法令等に規定されているが、排気中濃度限度及び排水中濃度限度の算出には、一般公衆が対象となるため、AMAD  $1\mu\text{m}$  に対して計算された各年齢層に対する線量係数を用いることが適当であるとしている。

このように、化学形や粒径ごとに内部被ばく線量評価のためのパラメータが与えられている。このため、パラメータとして、どの値を使用するかによって実際の線量と評価結果が大きく異なることとなる。

#### 3.1 化学形

加速器施設で生成される核種のうち、Ar、Kr 及び Xe の放射性同位体は不活性ガスとして取り扱うことができる。

$^3\text{H}$  は、元素状水素（HT）、メタン（ $\text{CH}_3\text{T}$ ）、HTO 及び有機物の化学形に対して、吸入摂取時の線量係数が与えられている。 $^3\text{H}$  は、化学形によって線量係数が大きく異なる。すなわち、 $^3\text{H}$  は、摂取時の化学形によって人体への影響が大きく異なる。これらの化学形に対する吸入摂取時の線量係数は、HT と  $\text{CH}_3\text{T}$  とでは、 $\text{CH}_3\text{T}$  の方が 2 桁高く、HT と HTO とでは、HTO の方が HT よりも 4 桁高い。また、有機物の線量係数は、HTO の 2 倍となる（図 1 (a)）。このため、 $^3\text{H}$  による内部被ばく線量を評価する上では、特に化学形が重要となる。

加速器停止直後に空气中濃度が高い C、N、O の放射性同位体は、空气中で複数の化学形が存在する可能性がある。 $^{11}\text{C}$  の場合、サブマージョンとしての取り扱うほか、蒸気、CO、 $\text{CO}_2$  及び  $\text{CH}_4$  について線量係数が与えられている。 $^{11}\text{C}$  の蒸気、一酸化炭素、二酸化炭素の線量係数は、 $\text{CH}_4$  の値の 40 倍から 120 倍となる（図 1 (b)）。サブマージョンとして取扱う場合、法令等に示された空气中濃度限度を比較すると、一酸化炭素や二酸化炭素に対する濃度限度よりも 2 桁緩くなる。

$^{13}\text{N}$  及び  $^{15}\text{O}$  については、 $\text{N}_2$  及び  $\text{O}_2$  以外にも  $\text{NO}_x$  や  $\text{O}_3$  等、空气中で様々な化学形を取り得る可能性がある。このうち、 $\text{NO}_x$  や  $\text{O}_3$  は反応性の高いガスである。しかし、ICRP や現行法令等においては、 $^{13}\text{N}$  及び  $^{15}\text{O}$  を不活性なガスとして取り扱うこととなっている。このため、サブマージョンによる外部被ばくに対してのみ線量評価が可能である。したがって、加速器施設での反応性の高い  $\text{NO}_x$  や  $\text{O}_3$  の生成割合を明らかにしておくことは重要である。

$^{38}\text{S}$  の場合は、二硫化硫黄ほか 3 種類の化学形に対して線量係数が与えられており、化学形によって最大約 2 倍の違いがある。Cl の放射性同位体は、粒子に対する線量係数が与えられているが、ガス状

成分に対する値が与えられていない。このため、HCl 等の反応性の高いガスが加速器施設に存在した場合、その線量を評価できない。加速器運転中の S 及び Cl の空气中濃度は、N、C、O に比べると 1 桁低い<sup>19)</sup>。しかし、例えば、<sup>39</sup>Cl の場合、半減期は 55.6 min であり、<sup>13</sup>N (9.965 min) に比べて長い。このため、運転停止から 70 min 経過すると、<sup>13</sup>N よりも <sup>39</sup>Cl の空气中濃度が高くなる。したがって、正確な線量を算出するためには、<sup>39</sup>Cl やこれよりも半減期の長い <sup>38</sup>S の性状 (粒子、ガス) を明らかにしておく必要がある。特に、Cl の場合、ガスに対する線量係数が与えられていないので、ガス成分が多い場合には、算出した結果に含まれる不確かさが大きくなる。

### 3.2 粒径分布

放射性粒子の場合、吸入による内部被ばく線量を評価する上で、問題となるのは粒径である。粒子は、粒径によって呼吸器道内での沈着部位が異なる。ICRP Publ. 66 では、吸入による内部被ばく線量を評価するため、呼吸気道モデルが与えられているが、このモデルでは、呼吸気道を胸郭外領域 1 (ET1)、胸郭外領域 2 (ET2)、気管支領域 (BB)、細気管支 (bb) 及び肺胞-間質領域 (AI) の 5 つに区分し、それぞれの領域別に粒径と沈着する粒子の割合が示されている。これらの値を用いて、呼吸気道の各領域の線量評価を評価することができる。さらに、ICRP Publ. 68 では、粒子を吸収の違いにより、F (吸収が速い成分)、M (吸収が中程度の成分) 及び S (吸収が遅い成分) の 3 つのタイプに分類することとなっている。

一例として、加速器施設で生成される <sup>38</sup>Cl、<sup>38</sup>S 及び <sup>24</sup>Na の粒径 0.001  $\mu\text{m}$  から 10  $\mu\text{m}$  に対する線量係数を図 2 に示す。<sup>38</sup>Cl の場合、最大の線量係数は粒径 0.001 から 0.003  $\mu\text{m}$ 、最小の線量係数は 0.2 から 0.3  $\mu\text{m}$  にあり、最大値と最小値の差は 4 倍から 5 倍となる (図 2 (a))。<sup>38</sup>Cl 粒子に対して、粒径 5  $\mu\text{m}$  の粒子に対する線量係数と 0.2 から 0.3  $\mu\text{m}$  の粒子に対する値を比較すると、粒径 5  $\mu\text{m}$  の粒子に対する値の方が 2 から 3 倍高くなる。このことは、デフォルト値として与えられた粒径に対する線量係数と実際の粒径に対する線量係数の値は異なる可能性があることを示唆している。また、計算を行った <sup>38</sup>S 及び <sup>24</sup>Na の線量係数も、粒径により数倍の差がある (図 2 (b) 及び (c))。

## 4. J-PARC 等大型加速器施設における内部被ばく線量評価法に関する研究現状

加速器施設で生成される放射性核種に関する研究としては、1960年代に Charalambus 等により加速器施設の空气中粒子やダスト等の放射性物質の空气中濃度評価が行われた<sup>23-26)</sup>。しかし、それ以降はほとんど行われておらず、1980年代までは、生成核種の化学形に関する知見はほとんどない。わが国では、KEK で 12GeV 陽子シンクロトロン<sup>27)</sup>の運転が開始されたことにより、施設安全の観点から、より詳細な生成放射性核種の性状に関する研究が行われるようになった。さらに、J-PARC 加速器施設の建設により、KEK 及び原子力機構において、J-PARC の施設設計や安全評価、防護対策に関する検討を行うために、さまざまな研究が実施されてきた。

### 4.1 生成核種同定及び生成量に関する研究

大型加速器施設で生成される放射性核種やその生成量については、村松らが KEK の 12GeV 陽子加速器ビームトンネル内の空気を測定することにより詳しく調べている<sup>15-18)</sup>。ビームトンネル内での各放射性核種の生成量は、<sup>15</sup>O (半減期 2.0 min) が  $1.5 \text{ Bq cm}^{-3}$  と最も高く、<sup>11</sup>C 及び <sup>13</sup>N が  $7.0 \times 10^{-1}$  及び  $5.2 \times 10^{-1} \text{ Bq cm}^{-3}$  であった。<sup>3</sup>H は  $5.9 \times 10^{-5} \text{ Bq/cm}^3$ 、<sup>7</sup>Be が  $1.7 \times 10^{-4} \text{ Bq cm}^{-3}$  と <sup>13</sup>N より 3 から 4 桁低く、J-PARC 設計報告書の計算結果と相対的な核種の割合はあまり変わらないが、KEK の結果では、このほか、<sup>18</sup>F (半減期 1.8 h)、<sup>38</sup>S (半減期 2.8 h)、<sup>38</sup>Cl (半減期 37.2 min)、<sup>39</sup>Cl (半減期 55.6 min) の生成も確認されている。これらの空气中濃度は<sup>3</sup>H とほぼ同じである。図 3 に、この結果を基に、加速器停止直後からの経過時間ともなう各放射性核種の空气中放射能濃度の減衰を計算した結果を示す。<sup>15</sup>O、<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N は短半減期核種であるため、直ちに減衰する。8 時間後には、<sup>3</sup>H や <sup>7</sup>Be のほか、<sup>15</sup>O、<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N 以外のほとんどの核種度が、<sup>15</sup>O、<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N の空气中濃度を上回る事となる。

村松らはこれらの実験において、ガスと粒子の弁別測定を行っている。この結果、<sup>7</sup>Be、<sup>13</sup>N、<sup>24</sup>Na、<sup>28</sup>Mg、<sup>44</sup>Sc、<sup>38</sup>S、<sup>38</sup>Cl、<sup>39</sup>Cl 等が粒子として、<sup>11</sup>C、<sup>15</sup>O、<sup>13</sup>N、<sup>18</sup>F、<sup>38</sup>S、<sup>38</sup>Cl、<sup>39</sup>Cl が気体として存在することが明らかになっている。

### 4.2 放射性ガスに関する研究

#### 4.2.1 <sup>3</sup>H に関する研究

加速器施設における<sup>3</sup>H の化学形については、三浦らが KEK のビームトンネル内で、化学形ごとに弁別捕集を行い、それぞれの濃度を測定している<sup>18,28)</sup>。この結果、加速器ビームトンネル内で生成される<sup>3</sup>H は、そのほとんどが HTO として生成され、HTO/HT の比が一般環境中の 1.6 よりも高く、50 となることが報告されている。時間が経過すると生成された HTO が壁面に沈着することにより、環境中の HTO/HT 比に近づく。CH<sub>3</sub>T は一般環境中と有意な差がない。これらのことから、加速器施設内空气中に存在する<sup>3</sup>H の化学形としては、HT 及び HTO のみを考慮すれば良いと考えられる。水銀ターゲット中に生成される<sup>3</sup>H の化学形については、真辺らによって調べられている<sup>28)</sup>。真辺らは、Li-Hg を封入した容器内を 1 Pa まで減圧して、水銀に含有する水分量を低下させ、これに熱中性子を照射して Li-Hg 中に<sup>3</sup>H を生成し、HT と HTO 割合を測定した。その結果、Li-Hg 中に生成された HTO/HT 比は 0.67 となることが明らかとなった。これは、空気放射化により生成されるビームトンネルと水銀



ターゲット周辺空気中の HTO/HT 比とは異なる可能性があることを示唆している。さらに、真辺らは、照射時の試料容器内の水蒸気分圧が異なる試料を用意して、照射容器内の圧力（水蒸気分圧）と、Li-Hg 中に生成される HT・HTO の割合との関係を明らかにしている<sup>29)</sup>。この結果、水蒸気分圧が 1 Pa 以上の場合、Li-Hg 中に生成される全  $^3\text{H}$  の 60%以上が HTO として存在し、試料容器内の水蒸気分圧が高くなるにつれて、HTO の生成割合が増加する傾向があることを示している。

#### 4.2.2 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 及び $^{15}\text{O}$ に関する研究

加速器施設において、加速器停止直後に、内部被ばくを評価する上で最も重要となるガス状成分は、生成量が多い  $^{15}\text{O}$ 、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$  である。遠藤らは、100MeV 電子加速器施設の加速器施設で生成される  $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  に着目し、これらの核種の化学形を明らかにした<sup>30)</sup>。粒子捕集には HE40T-A フィルタを用い、ガスの測定には電離箱を用いて粒子とガスを弁別捕集した。核種の同定は、電離箱のガスの放射能及びフィルタの放射能の減衰を測定することによって行った。この結果、粒子 HE40T-A フィルタ捕集成分（粒子）は、 $^{13}\text{N}$  が 79%、 $^{15}\text{O}$  が 15%、 $^{39}\text{Cl}$  が 6% を占めることを明らかにした。また、ガスの性状弁別には、電離箱測定と活性炭素繊維（ACF）フィルタを用いて測定を行い、ガス状成分のうち、5% が  $^{11}\text{C}$ 、17% が  $^{13}\text{N}$ 、78% が  $^{15}\text{O}$  あること、ACF フィルタに捕集されたガス成分の割合は、79% が  $^{13}\text{N}$ 、20% が  $^{15}\text{O}$ 、1% が  $^{39}\text{Cl}$  であることを明らかにした。さらに、遠藤らは、開発した  $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$  及び  $^{15}\text{O}$  の化学形弁別手法を用いることにより、 $^{11}\text{C}$  が  $\text{CO}_2$  として、 $^{13}\text{N}$  が  $\text{N}_2$ 、 $\text{NO}$ 、として、 $^{15}\text{O}$  が  $\text{NO}$ 、 $\text{O}_2$  として複数の化学形で存在することを明らかにした。これは、粒子成分を HE40T-A フィルタで捕集した後、ガスクロマトグラフ（熱伝導検出器 TCD）へ導入し、上記の 6 つの化学形に分離した後、放射線検出器で測定を行う方法である。この方法を用いれば、N、C、O の放射性同位体を  $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}$  及び  $\text{N}_2\text{O}$  の 6 つの化学形に弁別し、詳細な化学形の同定を行うことが可能である<sup>29)</sup>。C に対する被ばく線量を評価する場合には、CO についてもその生成割合が重要となる。そこで、遠藤らは、CO の測定法として、NaOH を塗布した拡散デニューダ、 $\text{Co}_2\text{O}_3$  及び NiO 含浸フィルタ、 $\text{NO}_x$  及び  $\text{O}_3$  モニタを組み合わせた方法を考案し、測定を行っている。この方法と上記の手法と組み合わせることにより、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  を線量評価に必要な化学形に弁別することが可能となった<sup>31)</sup>。この方法を用いて測定した結果、 $^{11}\text{C}$  は CO として 80%、 $\text{CO}_2$  として 20% の割合で存在することを明らかにしている<sup>32)</sup>。

遠藤らは、計算による  $^{13}\text{N}$  及び  $^{15}\text{O}$  の  $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{NO}$  及び  $\text{N}_2\text{O}$  の生成量の評価についても行っている<sup>33)</sup>。光核反応により反跳原子となった核種と、空気の放射線分解成分との反応を考慮することにより、生成割合とその時間変化を明らかにしている。この結果、照射直後は 25% から 50% が N 及び O 原子または  $\text{N}^+$  及び  $\text{O}^+$  イオンで存在し、残りは分子または  $\text{NN}^+$  か  $\text{OO}^+$  で存在すること、N または O 分子として存在する場合、その化学形は変化しないが、イオンで存在する場合は急速に中和され、中和後は、放射線分解で生成された N、O、 $\text{O}_3$  等と反応して、窒素酸化物が生成されることを明らかにしている。ガス状  $^{13}\text{N}$  と窒素酸化物の化学形については神田らによっても調べられている<sup>34, 35)</sup>。神田らは、デニューダ、 $\text{Co}_2\text{O}_3$  及び NiO 含浸フィルタ、 $\text{NO}_x$  及び  $\text{O}_3$  モニタを組み合わせた方法により、 $\text{HNO}_3$ 、 $\text{HNO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  及び  $\text{NO}$  の窒素酸化物とそれらの生成に影響を与える  $\text{O}_3$  を測定し、初期生成過程（生成開始から 400s まで）における  $\text{O}_3$  と窒素酸化物の生成割合との関係を明らかにした。

### 4.2.3 $^{38}\text{S}$ , $^{38}\text{Cl}$ 及び $^{39}\text{Cl}$ に関する研究

村松らは、 $^{38}\text{S}$ ,  $^{38}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{Cl}$  は、他の核種と異なり、粒子とガスの両方の性状を有しているという特徴を持っていることを明らかにしている<sup>17)</sup>。また、KEKの加速器ビームトンネル内において測定した $^{38}\text{Cl}$ および $^{39}\text{Cl}$ は、粒子として73%、ガスとして28%存在し、 $^{38}\text{S}$ は粒子とガスが各50%の割合で存在することを明らかにしている。

横山らは、加速器施設で生成される $^{38}\text{S}$ ,  $^{38}\text{Cl}$ 及び $^{39}\text{Cl}$ ガスと粒子の存在割合に着目した研究を実施した<sup>36)</sup>。実験は、照射ビームの種類、エネルギー、フラックス等を制御できる照射場が整備されているTIARA（原子力機構、高崎研究所イオン加速器研究施設）において実施した。実験では、気体を照射しても非放射性粒子が発生しない40MeV準単色中性子をフラックス $1.9 \times 10^4 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ で1時間から1時間半照射した。容器内には、粒子（フタル酸ジオクチル、DOP）濃度の異なるArガスを封入して照射し、 $^{38}\text{Cl}$ 及び $^{39}\text{Cl}$ に対するガスと粒子の割合を測定した。ガスの捕集には、アルカリ含浸フィルタのほか、活性炭素繊維フィルタを使用し、酸性ガスと酸性ガスフィルタを通過した成分に弁別した。この実験の結果、 $^{38}\text{Cl}$ 及び $^{39}\text{Cl}$ は、気相では粒子とガスとして存在するだけでなく、ガス成分には、塩酸のような酸性ガス成分と酸性ガス捕集フィルタには捕集されない非酸性ガスまたは酸性フィルタから揮発、脱離したものが存在することが明らかになった。また、この実験では、粒子成分が非常に少ない場合には、 $^{38}\text{S}$ は酸性ガスとして、 $^{38}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{Cl}$ はアルカリ含浸フィルタを通過するガス成分（活性炭素繊維フィルタに捕集）としてのみ存在し、粒子の気相中濃度が高くなるにつれて放射性粒子の割合が高くなり、 $10^6 \text{ cm}^{-3}$ 以上になると、気相中に浮遊する $^{38}\text{Cl}$ 及び $^{39}\text{Cl}$ のほとんどが粒子として存在することを明らかにした（図4）。Arガス濃度を高めた空気への陽子照射による実験でも、生成される共存粒子の個数濃度が $10^6$ - $10^7 \text{ cm}^{-3}$ の場合、着目した $^{38}\text{Cl}$ 及び $^{39}\text{Cl}$ に対する粒子とガスの割合は、粒子が80%、ガスが20%となった<sup>37)</sup>。これらのことから、 $^{38}\text{Cl}$ や $^{39}\text{Cl}$ のようなガスと粒子の両方の性状で存在するような核種については、陽子ビームのロスにより空気の放射線分解で粒子が生成、空気中の粒子濃度が高くなるような場では、浮遊性放射性核種のほとんどが粒子として存在し、粒子の発生しない場ではガスの存在量が多くなると考えられる。これらのことから、SやClの空気中での性状は周辺の気相雰囲気条件に大きな影響を受けると考えられる。

## 4.3 放射性粒子に関する研究

加速器施設では、 $^7\text{Be}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{28}\text{Mg}$ ,  $^{44}\text{Sc}$ ,  $^{38}\text{S}$ ,  $^{38}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{Cl}$ 等が粒子として存在する。これらの放射性粒子に対しては、線量評価上、粒子の粒径が重要となる。そこで、本項では、放射性粒子の生成機構と粒子の生成に伴う放射線場における発生粒子の粒径分布の時間変化に関する研究の成果について述べる。

### 4.3.1 放射性粒子の生成機構

加速器施設で生成される放射性核種の粒径分布に関する研究は、加速器施設の放射線管理の観点から、1980年頃からKEKにおいて着手された<sup>15)</sup>。近藤らはKEKの12GeV陽子シンクロトロン加速器のビームトンネル内で生成される浮遊性放射性核種のうち、粒子として存在する $^7\text{Be}$ に着目し、粒径

分布の測定と付着モデルによる放射性粒子の生成機構の解明を行った。解析では、粒子状の  $^7\text{Be}$  の放射能濃度を基準とした粒径分布及び共存粒子の粒径分布を拡散バッテリーにより測定し、この結果、加速器施設で生成される  $^7\text{Be}$  の粒径は、 $0.027 \pm 0.005 \mu\text{m}$  ( $\sigma_g = 0.36 \pm 0.02$ ) であり、サブミクロン粒子であることを明らかにしている。村松らは、12GeV 陽子加速器のビームトンネル内の空気をサンプリングし、 $^7\text{Be}$  の他に、粒子として存在する  $^{24}\text{Na}$ 、 $^{38}\text{S}$  の粒径分布の測定を行った<sup>17)</sup>。この研究では、近藤らと同様に付着モデルを用いて、個数を基準とした共存粒子の粒径分布から放射能を基準とした粒径分布を算出した。この結果、放射能を基準とした粒径分布は実験結果とよく一致し、 $0.028 \mu\text{m}$  ( $\sigma_g = 0.35$ ) であった。また、核種によって粒径に大きな差がないことを明らかにしている。

近藤や村松らは、加速器施設で生成される  $^7\text{Be}$  粒子についても、一般環境中で Rn 粒子が生成される機構と同様に、原子状の  $^7\text{Be}$  が共存している粒子に付着することによって生成されると考え、放射能濃度を基準とした粒径分布と個数濃度を基準とした粒径分布の測定結果を Natanson, Lassen 及び Rau の付着モデルの式を用いて解析を行っている<sup>38, 39)</sup>。この結果、加速器施設において生成される  $^7\text{Be}$  粒子についても付着モデルによって説明できることを明らかにした。

近藤や村松らの研究では、実際の陽子加速器トンネル内の空気をサンプリングし、解析を行っていたが、実際の方は複雑であり、陽子ビームによる粒子発生や照射エネルギーを制御できないといった問題があった。そこで、遠藤らは、ビームエネルギーやビームの種類、フラックス等の条件を制御可能な原子力機構の TIARA において研究を行った<sup>40-42)</sup>。この研究では、これまでに明らかにされていない空気中 Ar と高エネルギー陽子または中性子との核反応（核破砕反応）により生成される  $^{38}\text{Cl}$  及び  $^{39}\text{Cl}$  に着目し、放射性粒子の生成機構を解明するとともに、照射ビームのエネルギーと共存粒子の性状が放射性粒子の生成機構に与える影響を明らかにした。実験では、Ar と共存粒子を封入した容器（ $20 \text{ cm } \phi \times 100 \text{ m}$ ）を中性子ビームライン上に設置し、高エネルギー中性子を照射して生成された粒子状  $^{38}\text{Cl}$  及び  $^{39}\text{Cl}$  を静電式低圧インパクト（ELPI）を用いて粒径ごとに分級し、粒径ごとに放射能を測定することで、個数濃度を基準とした粒径分布及び放射能を基準とした粒径分布測定した。実験に中性子ビームを利用する利点は、空気へ照射した時に粒子が発生しないことである。このため、単純な付着による放射性粒子の生成機構を明らかにすることができる。近藤らと同様に放射性核種の生成は、共存粒子への付着によると考え、共存粒子の個数濃度を基準とした粒径分布が対数正規分布であると仮定して、付着係数  $\beta(d)$  を個数濃度を基準とした粒径分布  $N(d)$  に掛け合わせることで粒子状  $^{38}\text{Cl}$  及び  $^{39}\text{Cl}$  の放射能を基準とした粒径分布を算出した<sup>43-45)</sup>。付着係数は下記の式により算出する。

$$\beta(d) = \frac{2\pi D_0 d}{8D_0 + \frac{d}{d\nu_0} + 2\delta_0} \quad (1)$$

ここで、 $D_0$  は拡散係数 ( $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$ )、 $\nu_0$  は平均熱速度 ( $\text{cm s}^{-1}$ )、 $\delta_0 \approx d/2 + l_0$ 。  $l_0$  は非付着核種の平均自由行程。核種の表面付着確率は 100% とする。 $D_0$ 、 $\nu_0$  及び  $l_0$  は以下の式によって表される。

$$D_0 = \frac{3}{8} \frac{1}{(n_B + n_A)\sigma_{BL}} \sqrt{\frac{\pi kT(m_B + m_L)}{2m_B m_L}} \quad (2)$$



$$v_0 = \sqrt{\frac{8\kappa T}{\pi m_B}} \quad (3)$$

$$l_0 = \frac{1}{(n_B + n_L)\delta_{BL}} \sqrt{\frac{m_B}{m_B + m_L}} \quad (4)$$

$$\delta_{BL} = \frac{\pi(d_B + d_L)^2}{4} \quad (5)$$

ここで  $n_B$  及び  $n_L$  は非付着原子及び媒質ガスの濃度  $\kappa$  は Boltzmann 定数,  $T$  は絶対温度,  $m_B$  及び  $m_L$  は原子及び媒質ガスの質量,  $d_B$  及び  $d_L$  は非付着原子の直径及び媒質ガスの原子直径である。

解析の結果, 粒子状  $^{38}\text{Cl}$  及び  $^{39}\text{Cl}$  の生成もまた粒子状  $^7\text{Be}$  や  $^{24}\text{Na}$  の生成機構と同様に,  $^{38}\text{Cl}$  及び  $^{39}\text{Cl}$  と共存する共存粒子への付着により説明できることを明らかにした<sup>40)</sup>。この結果は, 高エネルギー放射線と空気中成分との核反応で生成される浮遊性放射性粒子は, 生成される放射性核種の種類によらず, 共存粒子への付着によって説明できることを示している。また, 遠藤らは, 放射性粒子の生成機構への照射中性子ビームのエネルギーの影響を調べるため, 45MeV と 65MeV の中性子ビームを共存粒子を添加した Ar ガスまたは Kr ガスに照射して粒子状  $^{38}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{Cl}$ ,  $^{83}\text{Br}$  及び  $^{84}\text{Br}$  の生成機構を明らかにした<sup>41)</sup>。その結果, 照射エネルギーに関係なく, 粒子状  $^{38}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{Cl}$ ,  $^{83}\text{Br}$  及び  $^{84}\text{Br}$  は同様に沈着モデルによりその生成を説明することができた。さらに, 佐藤らは, 共存粒子の性状の違いが放射性粒子の粒径分布や生成機構に及ぼす影響を明らかにするため, 共存粒子として DOP (液体) と NaCl (固体) を用い, これらをそれぞれ Ar ガスと共に容器内に封入し, 40MeV 中性子ビームを照射した<sup>42)</sup>。その結果, 放射性粒子の生成機構は, 共存粒子の性状に関係なく付着モデルにより説明できることを明らかにした (図 5)。

これらの一連の研究により高エネルギー放射線の照射による放射性粒子の生成機構は, 入射エネルギーや共存粒子の性状に関係ないこと, 共存粒子の個数濃度を基準とした粒径分布が測定できれば, その場の放射能濃度を基準とした粒径分布に関する情報を得ることができることが明らかになった。

#### 4.3.2 加速器施設で生成される放射性粒子の粒径分布

横山らは, 空気 (Ar ガス混合) に, 45MeV 陽子ビームを照射して, 生成される非放射性粒子の粒径分布の時間変化を明らかにしている<sup>37)</sup>。個数濃度を基準とした生成粒子の粒径分布は, 図 6 に示すように, 照射開始直後は, 0.01 と 0.02  $\mu\text{m}$  に 2 つのピークを持つ。これは, 照射開始と同時に発生した非常に多くの微小粒子が徐々に成長するとともに, 陽子の照射による空気の放射線分解で生成したガスの凝集により微小粒子の生成が続くためと考えられる。しかし, 個数濃度は粒子の成長にともない, 急速に低下した。これは, 初期に生成した粒子が粒子どうしの衝突により, より大きい粒子へ成長し, 放射線分解によって生成されたガスは, 粒子となる前に, 成長した粒子へ凝縮するためと考えられる。また, これまでの研究により, 放射性粒子の生成が放射性核種と共存する粒子への付着により説明ができることから, 実験で得られた共存粒子の個数濃度を基準とした粒径分布から放射性塩素粒子の放

射能濃度を基準とした粒径分布を推定した。この結果、放射能濃度を基準とした粒径分布については図7に示すように中央径が約  $0.1 \mu\text{m}$  となった。

さらに、電子線加速器における連続運転時の施設内空气中に生成される粒子の粒径分布の時間変化や粒子個数濃度の変化について、山崎らが報告している<sup>46)</sup>。この結果、ビーム輸送開始直後の粒径分布及び個数濃度の時間変化は、これまでの照射実験で得られた結果と傾向が一致した。図8に示すように、200分経過すると、粒子の総個数濃度は、ビーム輸送開始直後の値の1/5まで低下し、分布の最大値は  $0.2 \mu\text{m}$  となった。400から500min経過以降、粒子濃度はほとんど減少することなく、なだらかな分布となった。図9に2000時間後の個数濃度を基準とした粒径分布及び放射能を基準とした<sup>7</sup>Be, <sup>24</sup>Na, <sup>38</sup>Cl粒子の粒径分布を示す。個数を基準とした粒径分布については、2つの分布が合成されたような分布となる。この小粒径側の分布の中央径は  $0.085 \mu\text{m}$ 、幾何学的標準偏差は2.6、大粒径側の分布の中央径は  $0.25 \mu\text{m}$ 、幾何学的標準偏差は2.0であった。この個数濃度を基準とした粒径分布を基に放射能分布を算出すると、その中央径は  $0.45 \mu\text{m}$ 、幾何学的標準偏差は1.9となった。この放射能分布の中央径は、共存粒子の個数濃度分布の中央径（大粒径側の分布）の約1.8倍となる。粒子が、放射線分解によって生成される場合、粒子の主な構成要素は、硫酸や硝酸であると考えられる。このような粒子は通常  $1 \mu\text{m}$  以下であることから、これらの結果は、J-PARCのような大型加速器施設に施設で生成される粒子に対しても、適用できると考えられる。

これらの研究結果から、加速器施設のビームライン周辺において、空気の放射線分解により粒子が生成するような場所では、放射性粒子の粒径が原子力施設での線量評価において用いられるデフォルトの粒径 ( $5 \mu\text{m}$ ) よりも、明らかに小さい粒径となると考えられる。<sup>38</sup>Clの場合、粒径  $0.5 \mu\text{m}$  の粒子に対する線量係数は、粒径  $5 \mu\text{m}$  の粒子に対する線量係数よりも1/3から1/4となる。KEKのビームトンネル内空気をサンプリングして測定した粒径分布やビーム輸送初期においては、さらにこれよりも粒子が小さい<sup>15,17)</sup>。したがって、加速器施設で生成される放射性粒子に対する線量評価や防護対策を行う場合には、特に、ビーム輸送開始直後におこる粒径分布と粒子の個数濃度の急速な変化を把握しておくことが重要となる。

#### 4.3.3 非放射性ガスの化学形及び生成量

上述したとおり、放射性粒子の粒径は、共存している粒子の粒径によって決定される。このため、加速器施設において放射性核種と同時に生成される粒子の性状やその生成機構もまた放射性粒子の粒径を決定する要因となる。また、共存粒子の生成には、空気の放射線分解により生成されたO<sub>3</sub>、硫化物、窒素酸化物の化学形や生成量を決定する重要なファクタとなるだけでなく、機器類の腐食対策を行う上でも重要となる。近藤らは、加速器施設で生成された共存粒子をガスクロマトグラフにより測定した結果、生成される共存粒子に、一般環境中でサブミクロン粒子を形成する硫化物が含まれていることを報告している<sup>15)</sup>。平や神田らは、O<sub>3</sub>モニタとNO<sub>x</sub>モニタを用いて、総窒素化合物、NO、NO<sub>2</sub>、HNO<sub>2</sub>、HNO<sub>3</sub>の測定を行っている<sup>47-49)</sup>。この研究では、乾燥空気と湿潤空气中に生成されるO<sub>3</sub>、窒素化合物の生成量評価を行い、湿潤空気中では、OHやHO<sub>2</sub>が存在することにより、NO及びNO<sub>2</sub>と反応して、HNO<sub>2</sub>やHNO<sub>3</sub>が生成されること等を明らかにしている。また、ビームの電流値が上昇すると直ちに、加速器室内のO<sub>3</sub>及び窒素化合物の濃度が上昇する。これは、ビーム出力値とガスの生成に相

関があることを示している。神田らは、高エネルギー陽子ビームが空気に照射される場合の  $\text{HNO}_3$  の G 値（入射粒子 100 eV 当たりの硝酸の生成率）を 1.46 と推定している<sup>50)</sup>。 $\text{O}_3$  に対しても G 値を測定しており、6.4 という値を得ている。さらに、この  $\text{O}_3$  の G 値から推定した硝酸の G 値や制御された実験系で得られた値と Co-60  $\gamma$  線による G 値とほぼ同程度であることを明らかにしている<sup>49)</sup>。神田らは、これらの一連の研究で J-PARC のターゲット室内の硝酸の生成量は 21 g/日にもなると推定している。硝酸の生成量を低減させるには、水分や  $\text{O}_2$  を低下させる必要がある。

## 5. J-PARC 等大型加速器施設における内部被ばく線量評価への適用

第4章で述べた研究により、加速器施設で生成される浮遊性放射性核種の性状に関する多くの知見が得られた。本章では、これらの知見をどのように J-PARC 等大型加速器施設における内部被ばく線量評価に適用すれば良いかを述べる。

### 5.1 放射性ガスの線量評価

#### 5.1.1 Ar, Kr 及び Xe

不活性ガスである Ar, Kr 及び Xe の放射性同位体は、非常に安定で他の元素と容易に化合物を生成しない。このため、既存の原子力施設での評価と同様に、放射性雲中(サブマージョン)の放射性物質として、 $\gamma$ 線による外部全身被ばく線量を評価すればよい。

#### 5.1.2 $^3\text{H}$

ビームトンネル内で生成される  $^3\text{H}$  の場合、そのほとんどが HTO として存在していることがわかっている<sup>17)</sup>。このように HTO の生成量が多い原因としては、核破碎反応等で生成されたホットな  $^3\text{H}$  原子が、空気中に存在する  $\text{H}_2\text{O}$  と交換するためである。このことから湿潤空気中では、生成される  $^3\text{H}$  を全て HTO として線量を評価しても、実際の線量と大きな差はなく、適切に評価できる。一方、水銀ターゲット中でも多くの  $^3\text{H}$  が生成されるが、ターゲット容器内の気相部分には He ガスが充填される上、水銀中に存在する水分量は空気中とは異なり非常に微量である。このため、水銀中で生成される  $^3\text{H}$  は、空気中において生成される場合と HT と HTO の生成割合が異なる可能性がある。真辺らの実験及び解析によると、サージタンク内のガスの 99%が He ガスによって置換されたとしても、気相中の水蒸気分圧は 100 Pa であり、水銀ターゲット中に生成された  $^3\text{H}$  の 80%が HTO として存在することとなる<sup>29)</sup>。したがって、ターゲットから発生する  $^3\text{H}$  についても全て HTO として線量を算出しても、実際の線量とは大きな差がないと考えられる。しかし、ターゲット容器内の水蒸気分圧が非常に低い条件となった場合、実際の線量よりも 2 倍高く見積もることとなる。このため、実際の HT 及び HTO 濃度を把握するためには、施設稼動開始時にサージタンク内や気体廃棄システムのトリチウム回収系内の HT 及び HTO 濃度をモニタして、その生成割合を把握しておく必要がある。

#### 5.1.3 $^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ 及び $^{15}\text{O}$

遠藤らの研究から J-PARC 等陽子加速器施設においても、 $^{11}\text{C}$  は、 $\text{CO}$  と  $\text{CO}_2$  として評価することが可能である<sup>32)</sup>。 $^{13}\text{N}$  は、粒子としてもガスとしても存在することがわかっている<sup>31, 33)</sup>。ガスとしては、 $\text{N}_2$  だけでなく、 $\text{NO}_x$  の存在も無視できない。 $^{15}\text{O}$  の場合は、 $\text{O}_2$ 、 $\text{NO}_x$  及び  $\text{O}_3$  が生成される<sup>31, 33)</sup>。しかし、ICRP や現行法令等では、N 及び O に対しては不活性なガスとして取扱うとしている<sup>20)</sup>。このため、これらの核種に対する体内動態モデルが存在しないので、評価を行うことができない。これらは、加速器停止直後においては生成量が多いものの、短半減期核種であるため、運転停止後数時間で、他の核種よりも濃度が急速に低下する。このため、これらの核種が十分に低下した段階で施設内へ入

室すれば線量評価上、不確かさは考慮する必要がない。しかし、これまでの研究により、加速器施設において、明らかに窒素酸化物等、反応性の高いものが存在することから、今後、これらの評価が必要となった場合に備えて評価が行えるように、加速器施設での構成割合を把握しておくことは重要である。

#### 5.1.4 $^{38}\text{S}$ , $^{38}\text{Cl}$ 及び $^{39}\text{Cl}$

$^{38}\text{S}$ ,  $^{38}\text{Cl}$  及び  $^{39}\text{Cl}$  については、共存粒子の濃度等の実験条件により、粒子及びガスの割合が変化することが実験より明らかになっている<sup>36)</sup>。陽子ビームロスや高γ線照射場においては、ビーム輸送開始直後は、放射線分解等により、粒子の空气中濃度が  $10^7 \text{ cm}^{-3}$  となり、大量の微小粒子が生成される。これは、清浄な屋外空气中粒子濃度より 3 から 4 桁も高い。このような場所では、 $^{38}\text{S}$ ,  $^{38}\text{Cl}$  及び  $^{39}\text{Cl}$  は、粒子として線量を評価することが適当である。しかし、時間の経過にともない粒子が成長し、粒子濃度が減少した場合は、初期の空气中粒子濃度よりも 1 桁低下することが明らかになっている。山崎らの実験では、電子線加速器において、ターゲットより 1 m 離れた場所でサンプリングした場合、空气中の共存粒子濃度は  $10^5 \text{ cm}^{-3}$  となった<sup>46)</sup>。一方、中性子照射場においては放射線による粒子の発生はない<sup>37, 40-42)</sup>。このような場では、空气中の粒子濃度は、一般環境中濃度 ( $10^3$  から  $10^4 \text{ cm}^{-3}$ ) と同程度となる。横山らの実験結果 (図 4) から分かるとおり、空气中粒子濃度が  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  では、 $^{38}\text{Cl}$  及び  $^{39}\text{Cl}$  粒子の割合は 10% 以下となる<sup>36)</sup>。このように粒子濃度が低い場では、 $^{38}\text{Cl}$  及び  $^{39}\text{Cl}$  はガス状の成分で存在することとなる。また、ガス状の  $^{38}\text{Cl}$  及び  $^{39}\text{Cl}$  は、活性炭素繊維フィルタに多く捕集されることから、これらのガスは反応性の高いガスであると考えられる。ガス状の  $^{38}\text{Cl}$  及び  $^{39}\text{Cl}$  については線量係数が与えられていないため、ヨウ素と同じ反応性の高いガスであると仮定して線量係数を算出した<sup>37)</sup>。その結果、 $^{38}\text{Cl}$  ガスの線量係数は  $5 \times 10^{-8}$  から  $1.2 \times 10^{-7} \text{ mSv Bq}^{-1}$  となった。この値は、粒径  $5 \mu\text{m}$  のタイプ M の  $^{38}\text{Cl}$  粒子に対する線量係数の 1.6 倍、タイプ F の場合、1.1 倍高い値となる。

$^{38}\text{S}$  の場合、全てがアルカリ含浸フィルタに捕集されたことから、線量係数が与えられている蒸気 (二酸化硫黄を含む) として、評価することができる。 $^{38}\text{S}$  の線量係数は、蒸気の場合、 $2 \times 10^{-7} \text{ mSv Bq}^{-1}$ 、元素状成分の場合、 $3.7 \times 10^{-7} \text{ mSv Bq}^{-1}$  である<sup>20)</sup>。これらを同量吸入したとした場合、蒸気として評価した結果は、元素状成分とした場合の約 0.5 倍となる。

KEK の加速器トンネル内空气中の  $^{38}\text{S}$  及び  $^{38}\text{Cl}$  濃度は  $5.6 \times 10^{-5} \text{ Bq cm}^{-3}$  及び  $2.9 \times 10^{-5} \text{ Bq cm}^{-3}$  であったことから<sup>17)</sup>、核種の空气中濃度、上記に示した線量係数及び呼吸率 ( $1.2 \times 10^6 \text{ cm}^3 \text{ h}^{-1}$ ) を用いて、吸入摂取時の内部被ばく線量を計算すると、 $^{38}\text{Cl}$  に対する線量は  $4.2 \times 10^{-6} \text{ mSv h}^{-1}$ 、 $^{38}\text{S}$  に対する線量は  $1.3 \times 10^{-5} \text{ mSv h}^{-1}$  となる。計算の結果、 $^{38}\text{S}$  及び  $^{38}\text{Cl}$  を吸入した場合の線量は非常に低い。したがって、ビームトンネル等で作業する場合には、これらの核種の吸入に対して必ずしも防護の必要性はない。実験では  $^{38}\text{S}$ ,  $^{38}\text{Cl}$  及び  $^{39}\text{Cl}$  は活性炭を通過する成分はほとんどないことから、防護が必要な場合は、活性炭入りの吸収缶の着いたマスク等を着用すれば、十分に内部被ばくを低減することができる。

## 5.2 放射性粒子に対する線量評価

粒子として存在する核種は、 $^7\text{Be}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{28}\text{Mg}$ ,  $^{38}\text{S}$ ,  $^{38}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{Cl}$  である。放射性粒子は、原子状の放射性核種が共存粒子に付着するとして、その粒径分布を表すことができる。これまでの研究によ



り、陽子照射において生成される粒子は、硫酸や硝酸ミストのような液体の粒子であると考えられる<sup>36)</sup>。放射性粒子の生成機構に関しては共存粒子の性状（液体または固体）に関係なく、同じように付着モデルによって説明できる<sup>42)</sup>ことから、室内に存在しているダストのような固体粒子と陽子等の照射によって生成された粒子の両方の粒子に対して、同じように放射性粒子の生成が説明できる。また、遠藤や佐藤らの研究より、放射性粒子の生成は共存粒子の性状や放射線の照射エネルギーに関係なく、付着モデルによって説明できることがわかっている<sup>40-42)</sup>。このモデルを用いて計算した<sup>7</sup>Be, <sup>24</sup>Na, <sup>38</sup>Clの放射能分布から、核種に関係なくほぼ同じ粒径分布となる。また、山崎や横山の実験により、照射開始直後は、数から十数 nm の微小粒子が大量に生成されるが、その濃度は時間とともに急速に低下、分布の中央径も直ちに大粒径側に移動すること、その後は中央径が 0.25 μm となるなだらかな粒径分布となり、中央径や粒子個数及び放射能濃度に大きな変化が見られないことを明らかにしている<sup>36,46)</sup>。これらの放射能基準とした粒径分布の中央径は、0.45 μm であり、ICRP が作業者の線量評価に使用するためのデフォルト値として示している 5 μm の 10 分の 1 となる。この粒径の違いにより、線量係数が 4 から 5 倍異なる。すなわち、5 μm の粒径に対して求めた線量も 4 から 5 倍の違いがある。

5.1 に述べたように、<sup>38</sup>S や <sup>38</sup>Cl, <sup>39</sup>Cl に対する線量は非常に低いため、通常のモニタリングや線量評価では、評価に使用する粒径と実際の粒径との違い等を考慮する必要はないと考えられる。しかし、<sup>7</sup>Be 等に対しては、半減期も長く、生成量も比較的多いことから、換気が十分になされていない施設内に入室した場合、粒径を考慮しないと過大評価になる場合がある。しかし、粒子濃度や粒径分布については、通常、モニタリングを行っていないため、これらに関する情報がない。実際の粒径分布に対する線量評価が必要な場合には、これまでの研究から、陽子ビームが漏えいまたは 2 次粒子が発生し、粒子生成が起こるような場では、加速器の運転を開始した時間や経過時間から、加速器運転開始直後の大量に発生する微小粒子の粒子濃度や粒径分布を推測することができる。また、照射開始から数時間が経過すると、施設内空気中の粒径や濃度はほとんど変化しないとして評価すれば良い。

### 5.3 測定手法

通常の J-PARC での空気中の粒子及びガスの放射能濃度の測定は、ダスト（粒子）は、フィルタに捕集して放射能を測定する。物質・生命科学実験施設や機械室等では、ダストについてはサンプリングのみを行うこととなっている。また、揮発性粒子を捕集するために、活性炭素繊維（ACF）フィルタや活性炭カートリッジ（CHC）を用いた連続サンプリングが行えるような設備にすることとなっている。ダストについては、放射線作業の状況によりバックデータとして可搬型ダストモニタを使用することが可能である。

#### 5.3.1 粒子の捕集・測定

通常粒子捕集用フィルタの捕集効率、任意の粒径に対する値が示されている。このため、加速器施設で生成される微小粒子に対しても同様の捕集効率を得られるとは限らない。原子力機構内の既存施設における空気モニタリングには、粒子捕集用フィルタとして HE40T-A フィルタが使用されている。このフィルタは高い捕集効率を有するフィルタである。HE40T-A フィルタに対する捕集効率は、木内によって直径 0.03 μm から 1 μm までの粒子に対して調べられている<sup>51)</sup>。その結果、粒径 0.07 μm か

ら  $1.0 \mu\text{m}$  の粒子に対しては、面速 20 から  $130 \text{ cm s}^{-1}$  の試験条件において、捕集効率が 87%以上であることが明らかにされている。山崎や横山の実験から、長時間運転後、施設内空気中の放射性粒子の粒径は、十分に粒子が大きいことが明らかとなっていることから、上記の捕集効率を用いて評価しても問題がないと考えられる<sup>36, 46)</sup>。一方、加速器運転直後の生成粒子の粒径は、非常に小さいと考えられる。ナノ粒子の場合、サブミクロン粒子とは挙動が異なる可能性がある。このため、このような粒子の捕集を行う場合には、通常の粒子に対する捕集効率を適用できない可能性がある。

放射性粒子の粒径分布については、5.2 節に述べたとおり、通常のモニタリングや線量評価では、粒径分布が評価に用いる粒径と異なることによって過大評価となるものの、線量は低いため、大きな問題にはならないと考えられる。しかし、空気中の浮遊性放射性核種の生成量が問題となる場合には、実際の場の放射性粒子の粒径を把握する必要がある。この場合、施設内空気中の粒子の測定には、静電式低圧インパクト (ELPI) や拡散バッテリーを用いることによって、粒径ごとに粒子を分級捕集して、各粒径ごとの放射能を測定すれば粒径分布を明らかにすることができる。一方、これまでの研究により、放射性粒子が共存粒子への核種の付着によって説明できることから、共存粒子の個数濃度を基準とした粒径分布を測定することにより、4 章に示した式を用いて、放射能分布を明らかにすることができる。この場合、粒径ごとに放射能を測定するといった煩雑な作業を行うことなく、放射能を基準とした粒径分布を直ちに算出することができる。

### 5.3.2 ガスの捕集・測定

加速器トンネルの粒子及びガスの測定には、プラスチックシンチレーション検出器または NaI (Tl) シンチレーション検出器が使用される。物質・生命科学実験施設や機械室等のガスの測定には通気型電離箱を使用する。ガスモニタの校正は、シンチレーション検出器の場合は、主要核種のひとつであり、国家標準とのトレーサビリティが明確な  $^{41}\text{Ar}$  換算とする。しかし、加速器施設内の空気中には多くの  $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  が存在する。 $^{13}\text{N}$  及び  $^{15}\text{O}$  の空気中濃度限度 (サブマージョン) は、 $^{41}\text{Ar}$  の値の約 2 倍、 $^{11}\text{C}$  の値は、二酸化炭素の場合、 $^{41}\text{Ar}$  より 2 桁緩い値となる。したがって、加速器運転停止直後の線量評価においては、これらの放射性核種の存在が不確かさの要因となる。しかし、加速器停止後、数時間でガス状放射性核種に占める  $^{41}\text{Ar}$  の割合が高くなる<sup>4)</sup>。このため、通常のモニタリングや防護の観点からは、 $^{41}\text{Ar}$  に対して評価を行えば十分であると言える。

放射性ガス濃度が高く、放射性ガスに含まれる核種や濃度を詳細に調べたい場合には、ACF や CHC を用いると簡便にガスの捕集を行うことができる。また、ガスを性状ごとに弁別するためには、粒子捕集用フィルタ、 $\text{NaCO}_3$  含浸フィルタ、ACF、CHC 及び電離箱等のガスモニタを組み合わせた手法が利用できる<sup>35)</sup>。この方法は、放射性ガスの詳細な化学形までは分からないが、迅速かつ比較的容易に、粒子、酸性ガス、それ以外のガスに弁別することができる。

## 5.4 今後の課題

これまでの研究により、J-PARC で発生する内部被ばく線量を評価する上で必要な性状等に関する多くのパラメータが得られた。しかし、水銀ターゲット中でのトリチウムや放射性ヨウ素の気相移行挙

動に関しては、データがほとんど報告されていない。これらの研究成果については、今後、別途報告する予定である。

また、2007年12月にはICRPが新勧告を発表した<sup>52)</sup>。これに先駆けて、ICRPはICRP Publication 30の胃腸管モデルを改訂し、Publ. 100として、新しい消化管モデルを発表している<sup>53)</sup>。このモデルでは、胃腸管よりも上部の口腔、食道等の器官及び組織が追加、新知見に基づくパラメータの変更、各消化管壁の線量が標的組織に対して評価されることとなる等、より詳細な評価が可能になった。今後、この消化管モデルに必要なパラメータが刊行される予定である。また、体内動態モデルについても、新しいモデルが発表される予定である。このため、今後、線量評価のための新しい内部被ばく線量評価コードや新勧告に基づく線量評価が必要となる。



## 6. まとめ

J-PARC のような大型加速器施設において、空気中に浮遊する放射性核種の吸入摂取に対する内部被ばく防護やより実地的な内部被ばく線量評価を行うためには、放射性核種の性状に関するパラメータが重要となる。これまで、これらの情報を得るため、様々な研究が実施されてきた。本報告書では、内部被ばく線量評価上の課題と課題解決に向けた研究について紹介するとともに、J-PARC 等大型加速器施設における作業者の内部被ばく線量評価を行う際に、これらのパラメータを適用することにより、線量評価結果にどのような影響が現われるかを取りまとめた。これらのパラメータを使用することにより、大型加速器施設内で発生し、空気中に浮遊する多くの放射性核種に対して、合理的かつ正確な内部被ばく防護及び線量評価が可能になると考えられる。

## 謝辞

放射線安全セクションの宮本幸博氏には、本報告書をまとめるにあたり、研究成果の実務への適用に関し、有益な助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) ISIS web site, ISIS Pulsed Neutron & Muon Source: <http://www.isis.rl.ac.uk/targetstation2/>, アクセス最終日：2008/02/01.
- 2) Oak Ridge National Laboratory: [http://www.ornl.gov/ornlhome/neutron\\_science.shtml](http://www.ornl.gov/ornlhome/neutron_science.shtml), アクセス最終日：2008/02/01.
- 3) 山崎良成, 長谷川和男, 鈴木寛光, 富澤正人: “J-PARC 加速器, 高エネルギーニュース, Vol. 24, No1” (2005).
- 4) 大強度陽子加速器プロジェクトチーム: “Accelerator technical design report for high-intensity proton accelerator facility project, J-PARC.”, JAERI-Tech 2003-044 (2003).
- 5) 日本原子力機構: J-PARC センターウェブサイト: [http://j-parc.jp/ja/about\\_JPARC-j.html](http://j-parc.jp/ja/about_JPARC-j.html), アクセス最終日：2008/02/01.
- 6) 近藤健次郎: “高エネルギー加速器周辺の放射線管理”, 保健物理, **19**, pp.33-44 (1984).
- 7) 中村尚司: “放射線と加速器安全の工学”, 地人図書, 東京 (1984).
- 8) 坂元眞一, 明午伸一郎, 今野力, 原田正英, 三宅康博, 春日井好己, 武藤豪, 藤森寛, 小野武博, 池田裕二郎: “大強度陽子加速器計画物質・生命科学実験施設内の陽子ビームライントンネル技術課題の検討”, JAERI-Tech 2001-075 (2001).
- 9) 小林薫, 神永雅紀, 羽賀勝洋: “水銀ターゲットにおける核破砕生成物の熱化学的挙動の推定”, JAERI-Tech 2002-005 (2002).
- 10) 物質・生命科学実験施設建設チーム: “大強度陽子加速器プロジェクト物質・生命科学実験施設機器技術設計書”, JAERI-Tech 2004-001 (2004).
- 11) 坂元眞一, 明午伸一郎, 今野力, 甲斐哲也, 春日井好己, 原田正英, 藤森寛, 金子直勝, 武藤豪, 小野武博, 東茂則, 大竹秀範: “大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 3GeV 陽子ビーム輸送施設 (3NBT) 技術設計書”, JAERI-Tech 2004-020 (2004).
- 12) 宮本幸博, 池野香一, 秋山茂則, 原田康典: “大強度陽子加速器施設における放射線安全管理設備設計上の基本的考え方”, JAERI-Tech 2002-086 (2002).
- 13) 関本博, 井頭政之, 矢野豊彦, 小原徹, 大崎敏郎: “中性子照射により生成する鉛・ビスマス合金中のポロニウムの挙動に関する研究”, 原子力基礎研究 H10-026 (委託研究), JAERI-Tech 2002-008 (2002).
- 14) H. Hirayama, T. Miura, S. Ban et al: “Surface contamination measurement at KEK”, KEK Internal 80-5 (1980).

- 15) K. Kondo, H. Muramatsu, Y. Kanda, and S. Takahara: "Particle size distribution of  $^7\text{Be}$ -aerosols formed in high energy accelerator tunnels.", *J. Appl. Radiat. Isot.*, **35**, pp.939-944 (1984).
- 16) T. Miura S. Takahara, S. Ishihama, N. Ohtsuka and T. Kunifuda: "Depth Profiles of Radionuclides Induced in Shielding Concrete of the 12 GeV Proton Accelerator Facility at KEK.", *J. Nucl. Sci. and Technol. Supplement* **1**, pp.183-186 (2000).
- 17) H. Muramatsu, K. Kondo, and Y. Kanda: "Radioactive airborne species formed in the tunnels of a high energy accelerator facility.", *Appl. Radiat. Isot.*, **39**, pp.413-419 (1988).
- 18) 三浦太一: "OHO '05 高エネルギー加速器セミナー (テキスト), 10". 高エネルギー陽子加速器における放射化と環境への影響, 高エネルギー加速器科学研究奨励会 (2005).
- 19) H. Muramatsu, K. Kondo, Y. Kanda and S. Takahara: "Particle size distribution of radioactive aerosols formed in high-energy accelerator tunnels.", *Proceedings of the 5th Symposium Accelerator Science and Technology*, pp.375-377 (1984).
- 20) 日本アイソトープ協会: "アイソトープ法令集 I", 日本アイソトープ協会, (2005).
- 21) International Commission on Radiological Protection (ICRP): "Dose coefficients for intake of radionuclides by worker, Publication 68", Pergamon Press, Oxford (1994).
- 22) International Commission on Radiological Protection (ICRP): "Human respiratory tract model for radiological protection", Publication 66, Oxford: Pergamon Press (1994).
- 23) S. Charalambus et al.: "Aerosol and dust radioactivity in the halls of high-energy accelerators.", *Nucl. Instrum. Method.*, **56**, p.125 (1967).
- 24) A. Rindi et al.: "Airborne Radioactivity produced at high-energy accelerators.", *Nucl. Instrum. Method.*, **47**, p.227 (1967).
- 25) H. Vialettes: "Gas and dust activation in the target room of the saclay electron linac, identification of the produced radioactive nuclei and determination of the rejected activities.", *proceedings of second international conference on accelerator dosimetry and experience*, Conf-691101, pp.121-138 (1969).
- 26) C. Andreas et al: "Evaluation of the hazard from radioactive gas and ozone at linear electron accelerators, proceedings of the first symposium on accelerator radiation dosimetry and experience.", Conf-651109, pp.121-138 (1965).
- 27) T. Miura, Y. Oki, T. Suzuki, M. Numajiri, K. Kondo, and Y. Kanda.: "Relative abundance of HT and HTO in the accelerator tunnel air and atmospheric air.", *Applied Radiation and Isotopes*, **44** (3), pp.499-504 (1993)
- 28) K. Manabe and S. Yokoyama: "Ratio of tritiated water and hydrogen generated in mercury through a

- nuclear reaction.”, Applied radiation Isotopes, **66**, pp.122-125 (2008).
- 29) 真辺健太郎, 私信.
- 30) A. Endo, M. Kikuchi, S. Izawa and Y. Ikezawa: “Characteristics of the chemical Form of  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ , and  $^{15}\text{O}$  Induced in Air by the operation of a 100MeV electron linear accelerator.”, Health Physics, **68** (1), pp.80-88 (1995).
- 31) A. Endo, Y. Oki, Y. Kanda., K. Kondo: “Characterization of sup  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$  and  $^{15}\text{O}$  produced in air through nuclear spallation reactions by high energy protons.”, Proceedings of the 10th international congress of the International Radiation Protection Association on harmonization of radiation, human life and the ecosystem, [8 p.],CD-POM (2000).
- 32) A. Endo, Y. Oki, Y. Kanda, T. Oishi and K. Kondo: “Evaluation of internal and external doses from  $^{11}\text{C}$  produced in the air in high energy proton accelerator tunnels.”, Radia. Prot. Dosim., **93**, pp.223-230 (2001).
- 33) A. Endo, J. Henshaw and M. A. Mignanelli: “Time dependent chemical compositions of  $^{13}\text{N}$  and  $^{15}\text{O}$  induced in air by the operation of a high energy electron accelerator.”, Health Physics, **74** (4), pp.456-465 (1998).
- 34) Y. Kanda, Y. Oki, A. Endo, M Numajiri, and K. Kondo: “Airborne gaseous  $^{13}\text{N}$  species and noxious gases produced at the 12GeV proton synchrotron.”, J. Radioanal. Nucl. Chem., **247**, pp.25-31 (2001).
- 35) Y. Kanda and M. Taira: “Flow-injection analysis method for the determination of nitrite and nitrate in natural water samples using a chemiluminescence NOx detector.”, Anal. Sci., **19**, pp.695-699 (2003).
- 36) S. Yokoyama, K. Sato, H.Noguchi, Su. Tanaka, T.Iida, S. Furuichi, Y.Oki and T. Kaneto: “Characterisation of radionuclides formed by high-energy neutron irradiation.”, Radiat. Prot. Dosim., **116**, pp.401-405 (2005).
- 37) S. Yokoyama, K. Sato, K. Manabe, H. Noguchi, H. Kaneko, Y. Oki, T. Iida and Su. Tanaka: “Ratio of aerosol and gases of radioactive chlorine and particle size distribution of aerosol formed by high-energy proton irradiation.”, Radiat. Prot. Dosim. , **127**, pp.392-397.
- 38) G. Natanson: “On the theory of the charging of a microscopic aerosol particles as a result of capture of gas ions.”, Sov. Phys. Tech. Phys., **30**, p.573 (1960).
- 39) L. Lassen and G. L. Z. Rau, Z.: “The Accumulation of Radioactive atoms on aerosols.”, Phys., **160**, p.504 (1960).
- 40) A. Endo: “Study of particle size distribution and formation mechanism of radioactive aerosols generated in high-Energy neutron fields.”, J. Radioanal. Nucl. Chem., **256** (2), pp.231-237 (2003).

- 41) A. Endo, H. Noguchi, Su. Tanaka, Y. Kanda, Y. Oki, T. Iida, K. Sato, and S. Tsuda: “Particle size analysis of radioactive aerosols formed by irradiation of 65 MeV quasi-monoenergetic neutrons.”, *Appl. Radiat. Isot.*, **56**, pp.615-620 (2002).
- 42) K. Sato, S. Yokoyama, H. Noguchi, Su. Tanaka, Y. Kanda, Y. Oki, T. Iida, and S. Furuichi: “Attachment of  $^{38}\text{Cl}$  and  $^{39}\text{Cl}$  induced by high-energy neutron to coexisted aerosols.”, *J. Nucl. Sci. Technol. Suppl.*, **4**, pp.518–521 (2004).
- 43) J. Porstendörfer: “Die diffusionskoeffizienten und mittleren freien weglängen der geladenen und neutralen radon-folgeprodukte in luft.”, *Z. Physik*, **213**, pp.384-410 (1968).
- 44) J. Porstendörfer: “Die experimentelle bestimmung der koeffizienten der anlagerung der neutralen und elektrisch geladenen radon-folgeprodukte an aerosole.”, *Z. Physik*, **217**, pp.136-146 (1968).
- 45) J. Porstendörfer: “Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air.”, *J. Aerosol Sci.*, **25**, pp.219-263 (1994).
- 46) 山崎敬三, 沖雄一, 長田直之, 横山須美, 山田裕司, 床次真司, 福津久美子, 飯田孝夫, N. M. Rahmann, 下道國: “電子線型加速器(LINAC)における微粒子発生と誘導放射能”, 第23回エアロゾル科学・技術研究討論会要旨集 (2006).
- 47) Y. Kanda: “Measurement of Ozone, Oxides of N and nitric acid produced in the tunnel of a high-energy electron storage ring.”, *Health Physics*, **56** (6), pp.953-956 (1989).
- 48) Y. Kanda, T. Momose and M. Taira: “Characterization of radiolytic products from air at a high-energy by electron-positron stronge ring.”, *Radioat. Phys. Chem.*, **48** (1), pp.49-54 (1996).
- 49) M. Taira and Y. Kanda: “Diffusion denuder for sampling of atmospheric gaseous nitric acid.”, *Annal. Chem.*, **65**, pp.3171-3173 (1993)
- 50) Y. Kanda, Y. Oki, S. Yokoyama, K. Sato, H. Noguchi, Su. Tanaka and T. Iida: “Measurement of radiolytic yield of nitric acid in air.”, *Rad. Phys. Chem.*, **74**, pp.338-340 (2005).
- 51) 木内伸幸, 小野寺淳一, 吉野敏明, 村田幹生, 山崎敏克: “改良型放射性エアロゾルサンプリング用セルローズ・ガラス繊維濾紙の特性”, *保健物理*, **30**, pp.309-314 (1995).
- 52) International Commission on Radiological Protection (ICRP): “Publication 103, The 2007 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection.”, Pergamon Press, Oxford (2007).
- 53) International Commission on Radiological Protection (ICRP): “Human alimentary tract model for radiological protection, Publication 100.”, Pergamon Press, Oxford (2007).

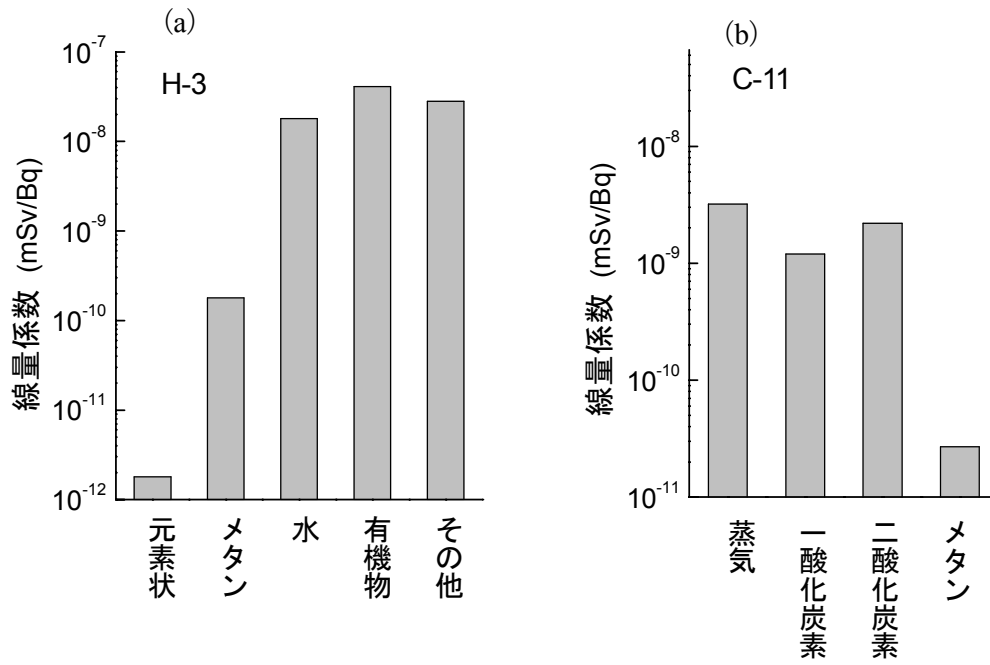


図1  $^3\text{H}$  及び  $^{11}\text{C}$  の線量係数

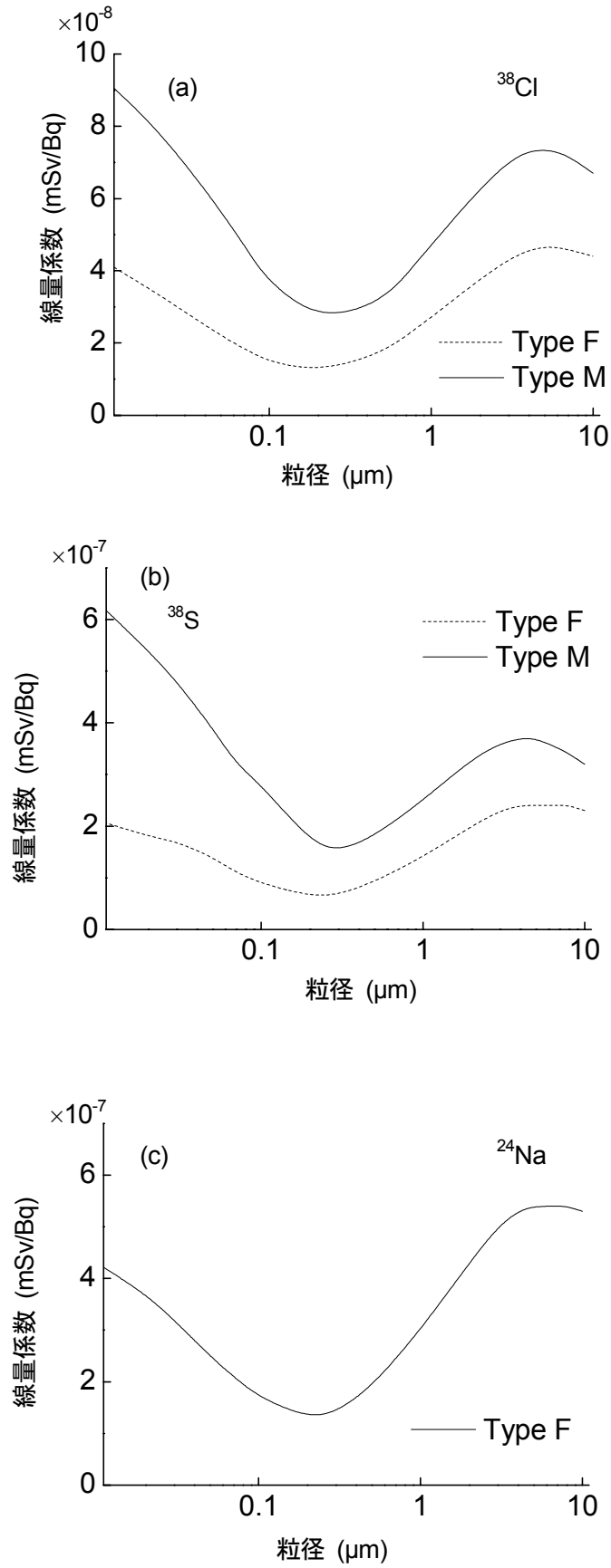


図2  $^{38}\text{Cl}$ ,  $^{38}\text{S}$  及び  $^{24}\text{Na}$  粒子の線量係数

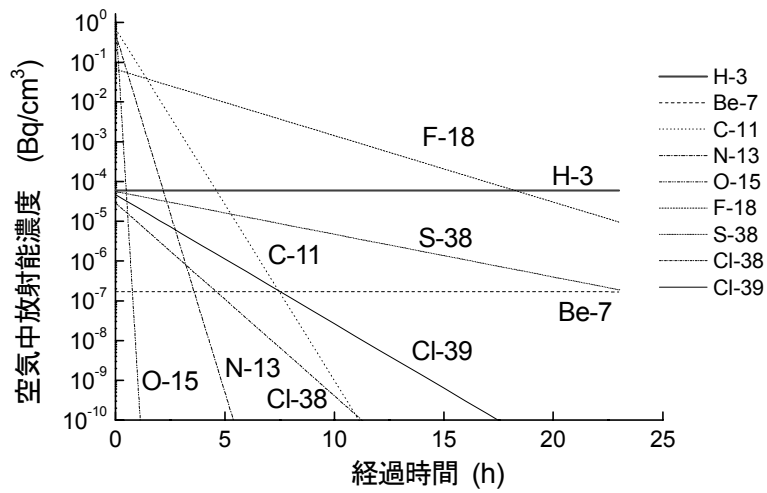


図3 ビーム停止後の空气中放射能濃度の時間変化

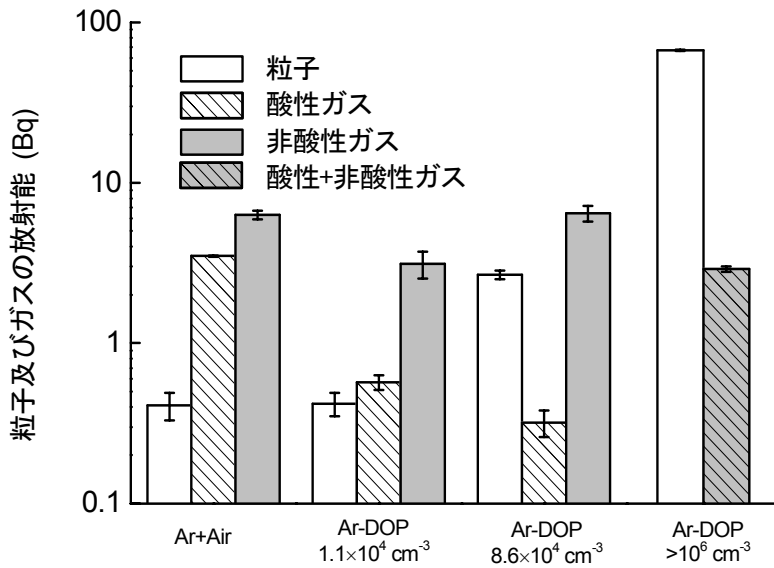


図4 共存粒子濃度が放射性塩素粒子及びガスの生成割合に及ぼす影響<sup>36)</sup>



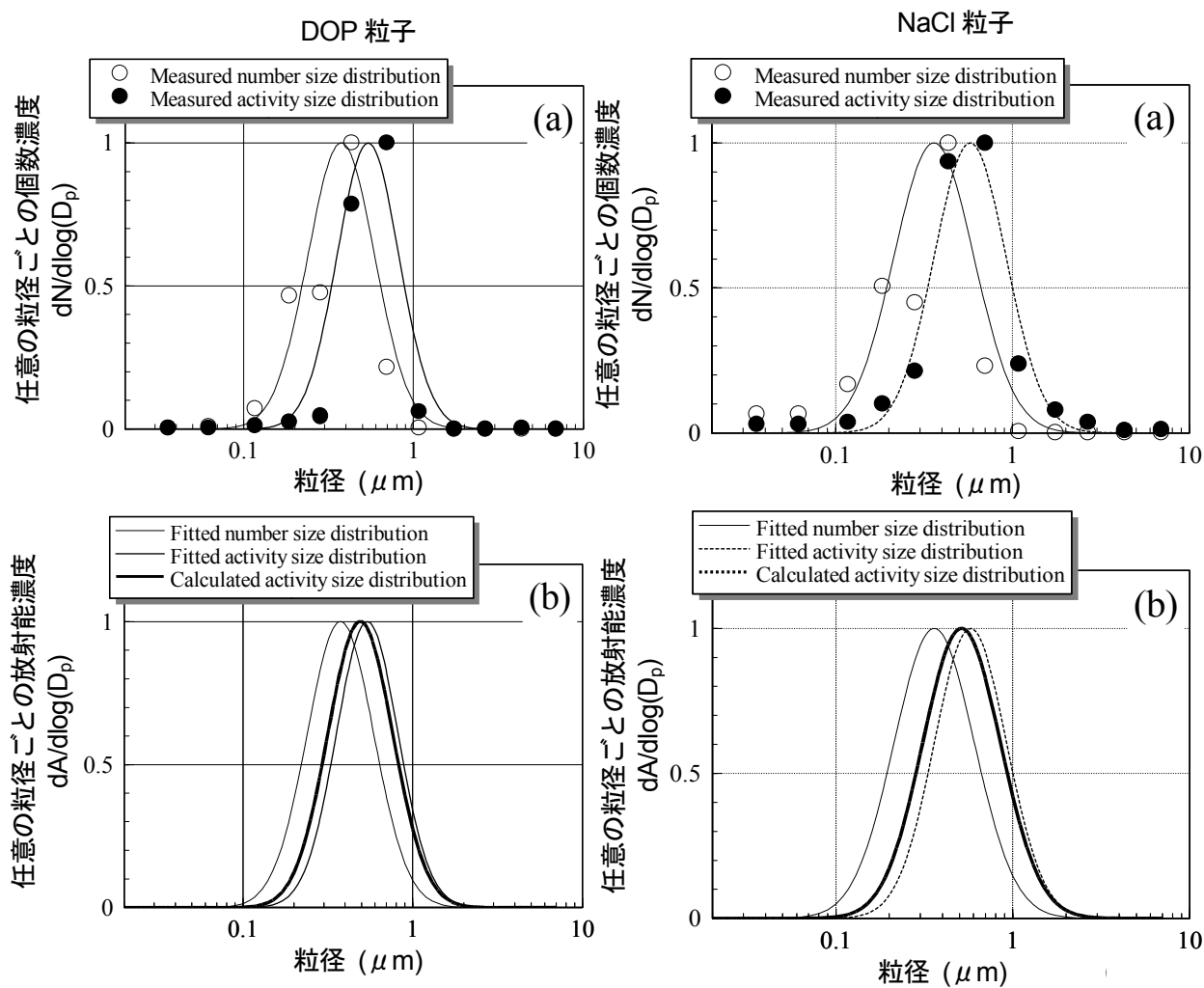


図5 放射性粒子の生成機構への共存粒子の性状 (DOP (液体) 及び NaCl (固体)) の影響<sup>42)</sup>  
 (a) 個数濃度を基準とした粒径分布及び放射能濃度を基準とした粒径分布の測定値, (b) 測定値から求めた近似曲線及び個数濃度を基準とした粒径分布の近似曲線から、計算によって求めた放射能濃度を基準とした粒径分布

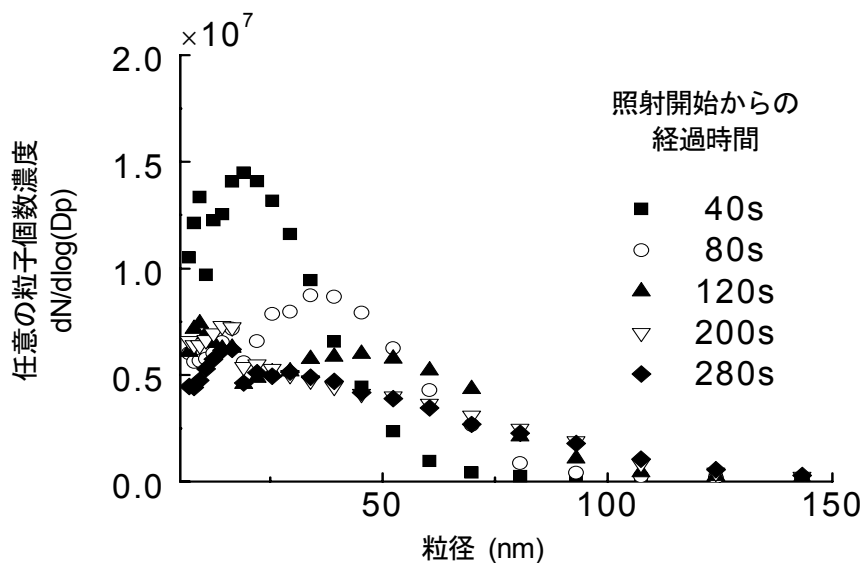


図6 陽子照射により生成された共存粒子の粒径分布の時間変化<sup>37)</sup>

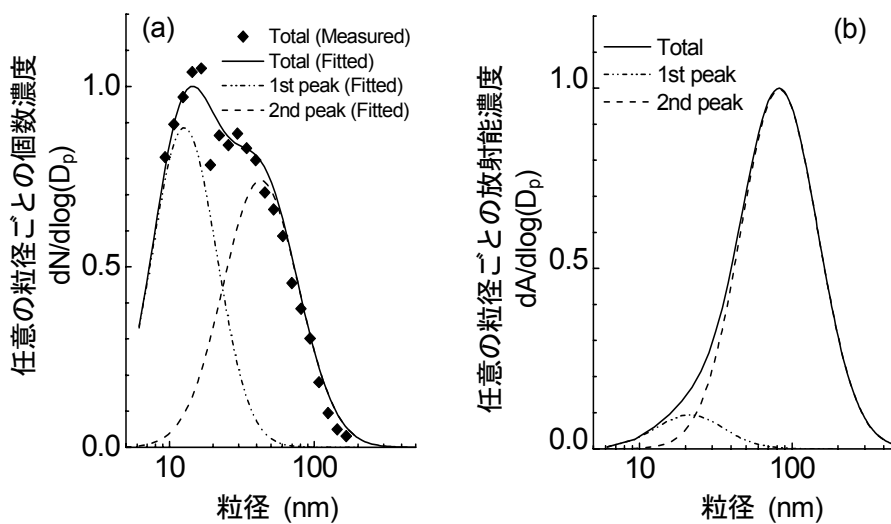


図7 (a)個数濃度を基準とした粒径分布及び(b) 放射能濃度を基準とした粒径分布 (核種： $^{38}\text{Cl}$ )<sup>37)</sup>

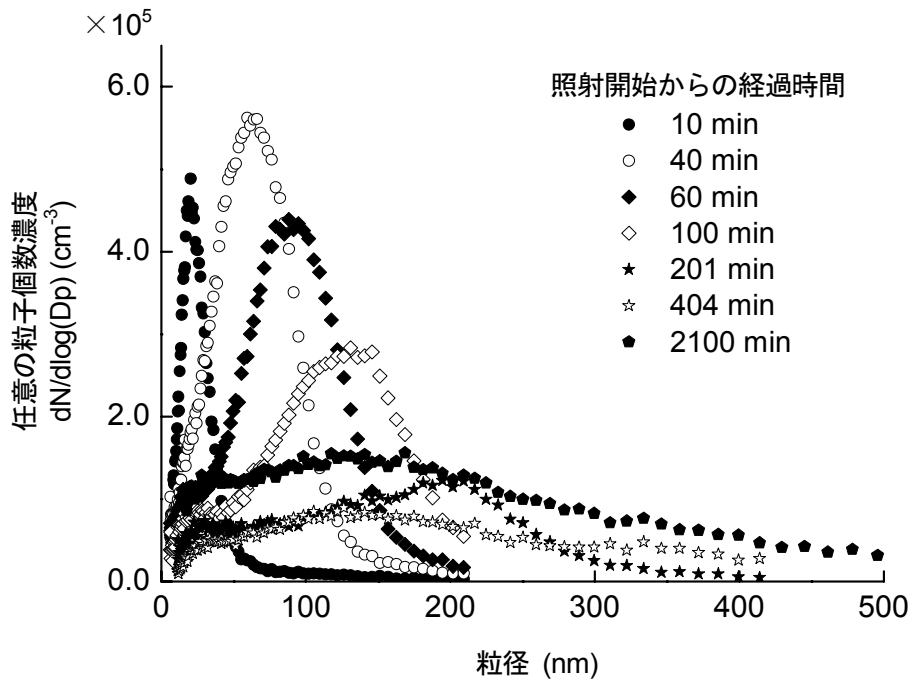


図8 電子線加速器ターゲット室内で生成された共存粒子の粒径分布の時間変化

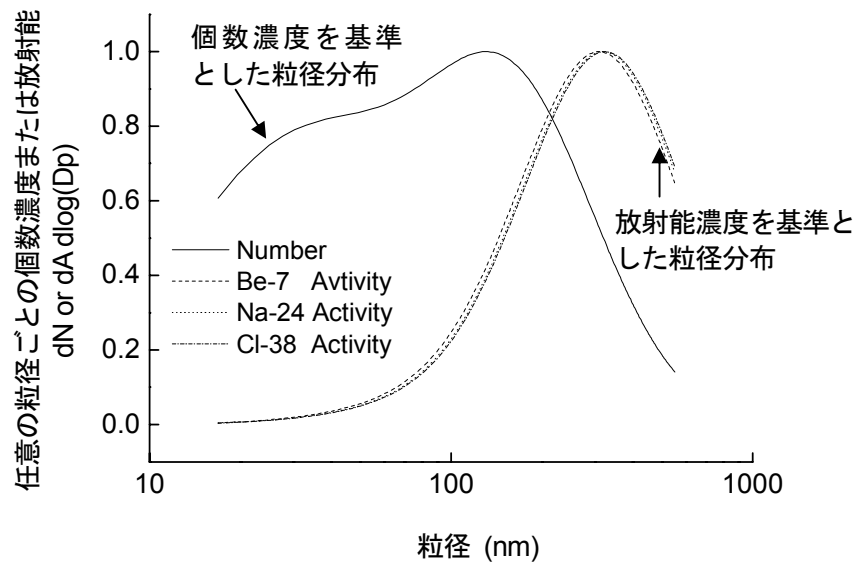


図9 放射性粒子の粒径分布 (計算値)

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	エクスト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad		m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> =1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>		m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> =1 <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup>
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s <sup>-1</sup> ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>4</sup> ・A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>3</sup> ・A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr <sup>(c)</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> ・cd=cd
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq	1m/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-3</sup> ・cd=m <sup>-2</sup> ・cd
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
	シーベルト	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。  
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。  
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。  
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> ・s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup>
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎平方メートル	J/K	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎メートル	J/m	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ジュール毎メートル	J/m	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup>
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> ・s <sup>-1</sup> ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> ・s <sup>-1</sup> ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-3</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>4</sup> ・A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・mol <sup>-1</sup>
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup> ・mol <sup>-1</sup>
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup> ・mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-1</sup> ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> ・m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> ・sr)	m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> =kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup>

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 <sup>-19</sup> J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 <sup>-27</sup> kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam <sup>2</sup> =10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm <sup>2</sup> =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
ガウス	G	1 G ≙ 10 <sup>4</sup> T
エルステッド	Oe	1 Oe ≙ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙ 10 <sup>-8</sup> Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
ホト	ph	1 ph=10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

表10. 国際単位系に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
X線単位		1 X unit=1.002×10 <sup>-4</sup> nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 <sup>-26</sup> W・m <sup>-2</sup> ・Hz <sup>-1</sup>
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

