

大強度陽子加速器施設の

放射線安全管理

1. はじめに

放射線や放射性核種は、放射線が発見されてから様々な分野で利用されている。加速器施設でも同様であり、J-PARCのMLF施設では核破砕反応で発生した中性子を利用している。放射線と放射能発見の歴史とさまざまな分野への利用については、本題から外れるので補足Aに示す。

大強度高エネルギー加速器施設では、高エネルギー放射線に対する遮蔽と、それにより生成される各種の放射化物に対する安全対策、放射線モニタリングや線量評価をはじめとする放射線管理、周辺土壌等の放射化による環境影響評価など、検討すべき課題は多岐にわたる。高エネルギー1次ビームが物質と相互作用して発生する2次放射線の量や、それらによる加速器と周辺機器、施設の構造材、空気、冷却水ならびに施設周辺の土壌の放射化の度合いは、近似的に1次ビームのエネルギーと強度に比例して増加する。

加速器施設の設計及び管理の基準は、「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」（2019年9月からは「放射性同位元素等の規制に関する法律」に変更、以下「RI法」という）に従っている。平成23年(2011年)の法改正で、放射化物は「放射線発生装置から発生した放射線により生じた放射線を放出する同位元素によって汚染された物」と定義され、基本的に放射性同位元素によって汚染された物と同様の規制を受けることになった。しかし、汚染物であっても放射化物に表面汚染があることはまれであり、ただちに放射性廃棄物として扱う必要はなく、再使用できることが大きな特徴となっている。これにより放射化物を放射線発生装置から取り外し、再使用することが可能になった。ただし、取り外した物を保管する場合、一定の基準を満たす「放射化物保管設備」を設けなければならない。さらに2017年の法改正には、大型加速器施設において事故を想定した危険時の措置の充実強化が求められている。

大型加速器施設においては、建設後に施設の構造等を容易に変更するのは難しく、加速器機器の遮蔽設計の他、機械棟など付帯設備についても設計段階から考慮しなければならない。特に高エネルギー大強度の加速器施設においては、スカイシャインを考慮し遮蔽を減らすために、地下または半地下式の構造とすることが多い。J-PARCの基幹施設である加速器本体機器は地下部に設置され、十分な遮蔽設計の元に建設されている。地上部に設置される実験施設の遮蔽についても、十分な遮蔽設計が必要である。J-PARCでは事業所境界における線量を $50\mu\text{Sv}/\text{年}$ 以下とする遮蔽設計をしている。遮蔽とスカイシャインについては、過去のOHO講座で紹介されている（参考文献）ので、ここでは詳しく述べない。

放射線安全管理については、放射化に伴う被ばく管理、汚染管理、排気管理、排水管理、放射化物の管理、廃棄物管理等があるが、その他運転時に放射線発生装置室（加速器トンネルなど）に人がいないようにするインターロックなどの安全機器、放射線モニターなど様々な機器を用意する必要がある。インターロックなどの放射線安全対策も、施設設計の検討段階から考慮すべき重要な問題である。ここでは、安全設備については触れないが、「放射線発生装置のインターロック及び安全設備に関するガイドライン」[1]に、設計に重要な考え方が述べられている。

大強度陽子加速器であるJ-PARCのようにエネルギーがGeVを超え、1MWの出力の加速器については、従来の加速器施設(KEK-PS)以上に、運転後に様々な核種で高強度の放射化物が発生する。また、このような高強度の放射化物は、密封線源、非密封線源、放射性廃棄物と同様な取扱いが必要となる場合もある。ここでは、J-PARCなどの大型加速器施設における放射化と、それに基づく放射線安全管理について紹介する。

2. 加速器施設における放射化

1) 放射化について

高エネルギー加速器特有のこととして、加速器本体装置および周辺機器、空気、冷却水の放射化という問題が生じる。放射化させる粒子としては1次粒子や2次粒子があり、放射化の程度は、加速粒子の種類、エネルギーやビーム強度によるが、放射化する材質（金属、コンクリート、空気、冷却水など）により生成する核種が異なる。また生成量は、時間とともに核種の半減期、照射期間、冷却期間で増減する。

加速器の周辺機器、遮蔽壁や床、空気などの放射化は、主としてハドロンカスケード、または電磁カスケードで発生する2次放射線によって起こる。なかでも中性子は、物質との相互作用が小さく透過力が大きいので、広い範囲にわたって放射化を引き起こす。2次中性子のエネルギーと収率は、それぞれ加速粒子エネルギーとビーム損失に比例するため、高エネルギー、大強度になるほど中性子による放射化が重要になる。中性子発生の上級エネルギーは、標的が重陽子については約2MeV、それ以外の場合には一般に重い標的核（鉛、タンゲステンなど）では約6MeV、中重核（鉄、銅など）では約10MeVである。

高エネルギー荷電粒子の飛程は、例えば10GeV陽子の場合でも金属中で数10cmのため、1次および2次荷電粒子による放射化はビームラインに沿った領域でしか起こらない。しかし、1次ビームは収束され線束が大きいため、1次ビームによる放射化物中の放射能濃度は非常に高くなる。一方、電子加速器では、加速された電子が物質中に入射した際に、電子の制動放射による光子の生成と、光子による電子・陽電子対の生成とが交互に繰り返され粒子数が増えてゆく電磁カスケードシャワーが発生し、これによる光核反応で放射化が起こる。電磁カスケードによる光核反応は広い領域にわたって起こるため、放射化物中の放射能濃度は荷電粒子による場合と比べて小さい。電子

加速器における放射化のレベルは、同一出力の陽子加速器と比較すると、1/100程度であるといわれている。

陽子加速器の場合、加速粒子エネルギーが数MeVを超えると、標的となる原子核と入射陽子とで形成される複合核を経た粒子放出反応により放射性核種が生成される。加速粒子エネルギーがさらに高くなり100MeV以上になると、粒子のドブロイ波長(約3fm)が原子核の核子間距離に匹敵するようになり、核破砕反応が起こる。核破砕反応は、R.Serberの2 step model[2]で説明される。まず、加速粒子の入射によって起こる原子核内のハドロンカスケード(核内カスケード)により多粒子放出が起こる。引き続き、十分に高い励起エネルギーを持つ残留核から粒子の蒸発が起こり、同時に、軽核を放出する断片反応や、重核の場合は核分裂反応も進行する。詳しくは、補足Bに説明している。

核内カスケードにより放出された高エネルギーの核子は、さらに他の原子核と衝突しカスケードを起こす(核外カスケード)。その結果、加速粒子と標的核とで形成される複合核から ${}^3\text{H}$ (トリチウム)に至るすべての質量数の放射性核種が生成される。これら一連のカスケードにより、熱エネルギーから高エネルギーに至る広いエネルギースペクトルを持つ2次中性子が発生する。熱および熱外中性子は(n, γ)反応により放射性核種を生成するが、速中性子では核子放出反応が主となる。さらに中性子エネルギーが100MeV以上になると、核反応機構は陽子と実質的に同じで、核破砕反応が起こる。

図1には、Auをターゲットにした時、入射陽子エネルギーに対する生成核の質量数と生成断面積の関係を示す。0.2 GeVでは、標的核(${}^{197}\text{Au}$ 安定元素)の質量数近傍の核種のみが生成するが、陽子エネルギーの上昇と共に生成核種は広く質量数や原子番号で多種類にわたるようになる。高エネルギー核破砕反応での生成核種は、多くは放射性であり、非常に広範囲のA-Z領域に分布する。図1の横軸は生成核の質量数、縦軸は同じ質

量数を持つ核種の生成断面積の和を取ったものである。

$$\sigma(A) = \sum_Z \sigma(A,Z)$$

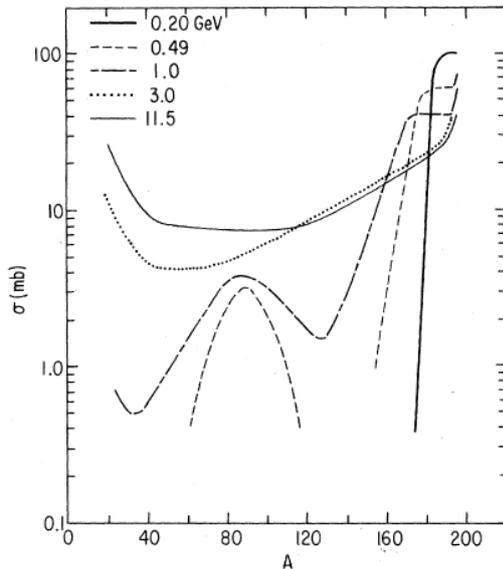


FIG. 8. Comparison of the mass-yield distributions for protons of energies 0.20–11.5 GeV interacting with ^{197}Au .

図1 標的に 0.20 から 11.5 GeV の入射エネルギーの陽子を照射した際の生成断面積の質量数依存性 [3]

入射エネルギーが 0.2GeV (200MeV) では、標的核付近の質量数をもつ核種のみが生成するが、入射エネルギーが高くなるにしたがって、標的核の質量数から離れた核種が生成してくる。

0.5GeV (500MeV) では、核分裂反応のように標的核の半分程度の質量数を持つ核種が生成する。入射エネルギーが数 GeV 以上となると比較的軽い核種の生成が増加するが、質量数全体分布の変化は小さくなる。

管理すべき放射化としては、加速器本体、周辺機器施設の構造材（鉄、コンクリート）の放射化の他、空気、冷却水、加速器トンネル周辺の土壌の放射化がある。加速器機器から取り外した放射化物の管理については、放射化物保管設備での管理が必要である。加工をする場合には、非密封

RI 使用施設と同じような施設が必要となる場合がある。壁や床のコンクリート材深部の分布については KEK-PS や J-PARC で測定している。また、熱中性子捕獲断面積が大きいことから、熱中性子による放射化も重要である。

生成した放射性物質の中でガンマ線を放出する核種については比較的放射能を測定するのが容易だが、ベータ線やX線のみを放出核（トリチウム、 ^{14}C 、 ^{55}Fe 、 ^{63}Ni ）については、簡易に測定することが困難である。これらの核種では、あらかじめガンマ線核種生成量との関係を測定しておく必要がある。

下図に銅中でのハドロン（中性子または陽子）による核破砕生成核種の生成断面積を示す[3]。この断面積は Rudstam の式（半経験式）[4]による計算値である。中性子エネルギーが増加するのに従い、生成核種の断面積が増加する。核種によって、その生成させる中性子のエネルギーが異なる。

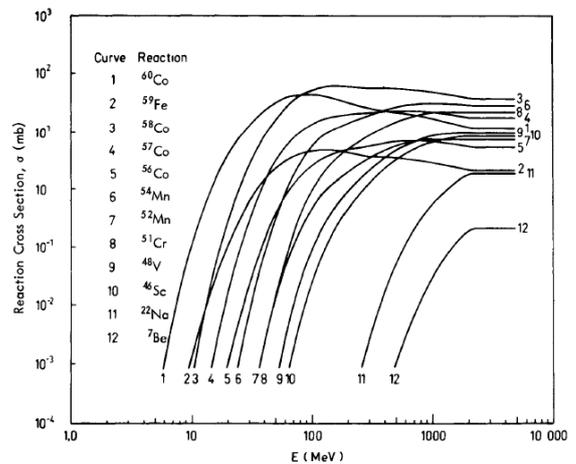


図2 中性子エネルギーに対する銅から生成する核種の断面積[4,5]

加速器トンネル内で照射された鉄中に生成する核種の運転停止後の放射能の変化を図3に示す[6]。

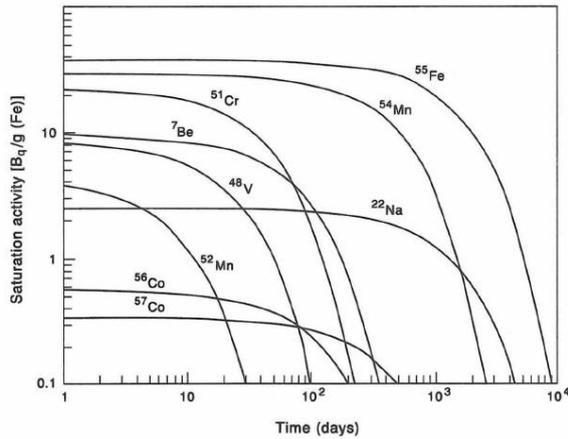


図3 KEEK-PS の遅い取り出しラインで照射した鉄中の放射能の時間変化[6]

高強度の陽子加速器施設においては、ビーム加速トンネル内遮蔽コンクリートの放射化が想定され、加速器機器等の保守時の作業員の外部被ばく線量の低減対策が課題となる。大強度陽子加速器施設(J-PARC)では、コンクリート選定にあたり、トンネル内遮蔽コンクリートの一部(トンネル内側)に、石灰石を骨材とする低放射化コンクリートを採用した。図4に、J-PARCのMR入射部付近のコンクリート壁中の放射能の深度分布を示す。

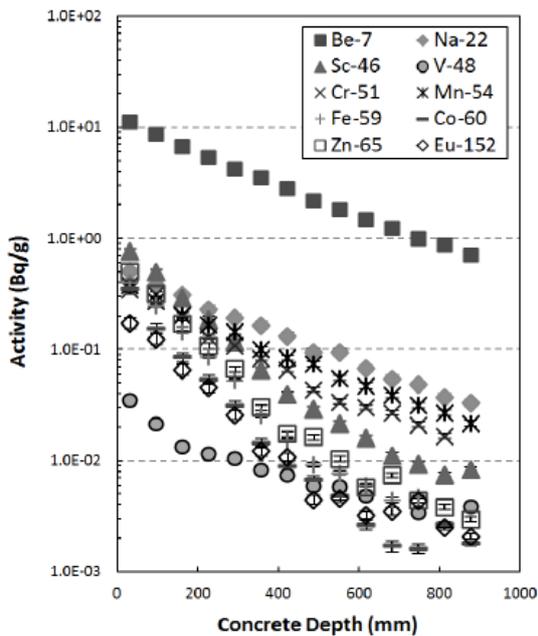


図4.7-1 MR入射点付近コンクリートにおける生成核種濃度の深度分布

図4 MR入射部付近のコンクリート壁における生成核種の深度分布[7]

2) ターゲット内に生成する核種

ターゲットは、高エネルギーの陽子が直接衝突するため高度に放射化する。生成する核種は標的核により多種多様となる。KEK-PSにおいて様々な標的核について12GeV陽子を用いて生成断面積を測定している。例として金標的におけるターゲット中に生成する核種の分布の実験結果を示す[8]。実測された核種の断面積は、○●で示されている。○: Independent 親核を含まない核種

●: Cumulative 崩壊系列の親核の生成を含む核種、—: 実線(破線) 計算式による同じ質量数を持つ核種の断面積の和である。わかりやすくするため、元図から500MeVの結果は図から除いている。

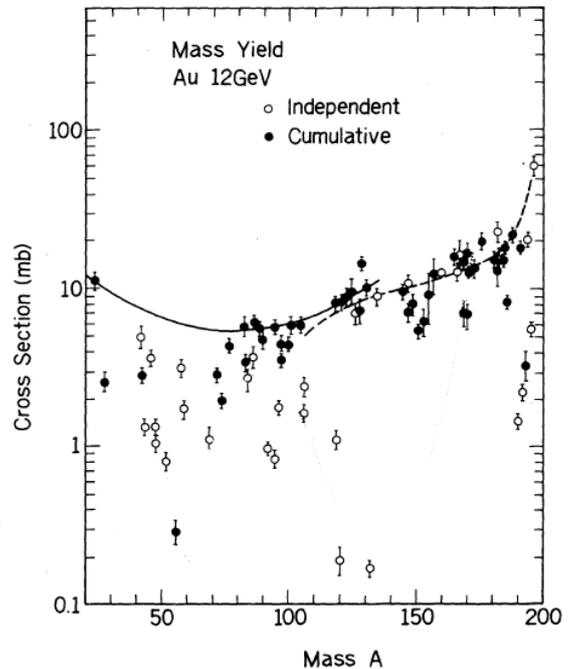


Fig. 6. Mass-yield distribution in nuclear spallation reactions of gold with 12-GeV protons. See the figure caption of Fig. 4 for detailed explanations of the figure.

図5 KEEK-PSの12GeV陽子を金標的に照射した時の生成断面積の質量数分布[8]

標的の近傍の生成核種他、軽い核種の生成も見られる。特に、質量数が50以下の増加が予想される。その中の軽い生成核種に放射線管理で重要なトリチウムがあるので、トリチウムについて取り上げる。

大強度陽子加速器では、空気中の原子から生成される放射性核種に加えて、核破砕反応によりターゲット中に生成されるトリチウムも重要な内部被ばく源になることに注意する必要がある。野口らは、種々の金属試料を12GeV陽子で照射し、核破砕反応によるトリチウム生成断面積を評価した。第6図に、12GeV陽子によるデータと他のエネルギーでの報告値をまとめたものを示す。トリチウム生成断面積は、陽子エネルギーが約2GeVまではエネルギーと共に増加するが、それ以上ではエネルギー依存性がほとんど見られない。実験データから、12GeV陽子に対するトリチウム生成断面積 σ (mb)は、ターゲット元素の質量数(A)と $\sigma(A)=95\exp(A/107)$ の関係で表される(図7)。関係式を用いて、1gのCu(トリチウム生成断面積170mb)、ターゲットに12GeV陽子 10^{12} 個を照射した場合について、ターゲット内に生成される放射能とそれらの時間変化(半減期減衰)を計算した結果を第8図に示す。照射終了直後は ^7Be が主成分であるが、約1年経過すると、残留放射能のなかでトリチウムの占める割合が最も高くなる。また、より高い中性子発生率を得るために、Cuの代わりにW(トリチウム生成断面積530mb)やPb(660mb)などの質量数の大きな元素をターゲットに用いた場合、トリチウム生成量はCuの場合の数倍になる。

トリチウムの半減期は12.3年なので、生成量が飽和に達するには時間を要する。しかし、大強度ビームで照射した場合は生成量が大きく、また、ビームの出力が大きいため冷却を施してもターゲット温度が上昇することは避けられないことから、生成されたトリチウムがターゲット外部へ拡散することが考えられる。トリチウムは、半減期が長く、 ^7Be 等のエアロゾルと異なりへパフィルタ等によって捕集されないため、環境への影

響という観点から、注意を要する重要な核種である。したがって、大強度加速器施設では、トリチウムに対する生成量の評価や除去対策およびトリチウムに基づく線量評価が必要になる。その他、ビーム強度が大きい場合には、 ^{14}C (半減期5700年)の生成も考慮する必要がある。図9に12GeV陽子照射によるアルミニウム中のトリチウム、 ^{14}C の生成断面積を示す。 ^{14}C は、一度生成すると半減期が長く、時間による減少が期待できない。

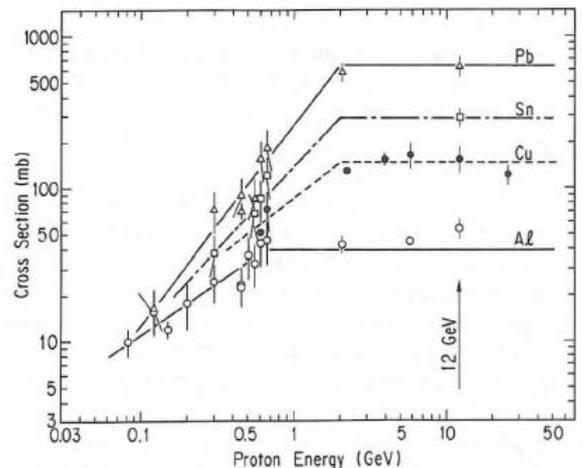


図6 陽子エネルギーに対するAl,Cu,Sn,Pb中のトリチウムの生成断面積[9]

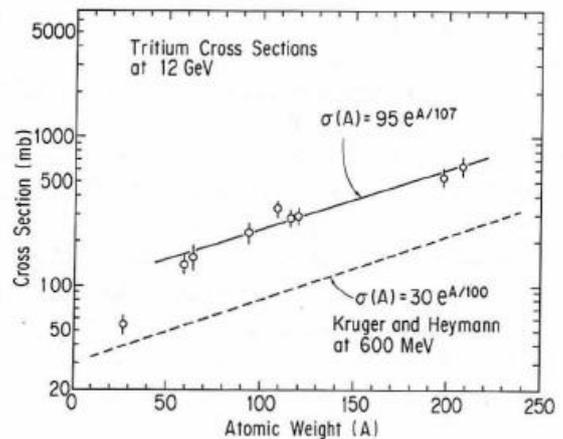


図7 標的の質量数に対するトリチウムの生成断面積[9]

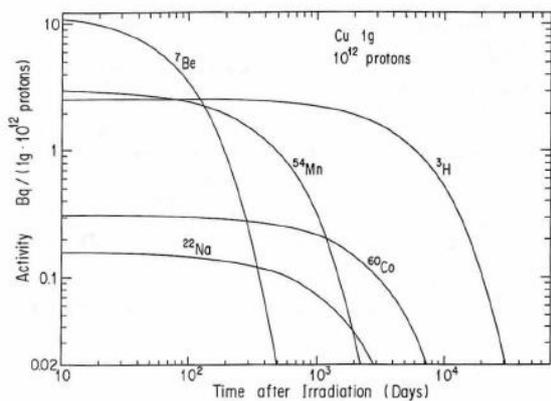


図8 10¹²個の陽子(12GeV)が入射した場合に銅1g中に生成する核種の時間変化[9]

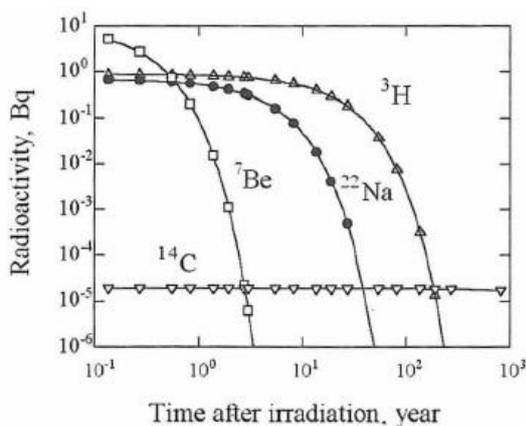


図9 アルミニウム中に生成する核種の時間変化[10]

3) 外部被ばく

外部被ばく防護の三原則の一つに遮蔽があり、J-PARCでは実験施設では十分な遮蔽を置き、共同利用者、作業員に対して、外部被ばくを低減している。これまで(2017年度現在)、共同利用者の有意な被ばく線量は検出されていない。また、すべての放射線従事者においても中性子による被ばく線量は検出されておらず、外部被ばくとしては、加速器トンネル内で作業した被ばく(ガンマ線)によるものである。つまりJ-PARCの外部被ばくについては、実験室等の運転時の被ばく線量でなく、停止後の保守作業による被ばく線量のみとなっている。

KEKつくばキャンパスの陽子加速器施設(KEK-PS)との被ばく線量の比較を行った。KEK-PSは、12GeV陽子シンクロトロンから取りだされる陽子ビームを利用して、1977年から2005年まで素粒子や原子核等の研究が行われた実験施設で、ブースターリング(500MeV)からの陽子ビームも中性子、中間子、医学利用にも使用された

(<https://www.kek.jp/ja/Facility/IPNS/PS/>)。図10に、KEK-PSの加速器稼働後の総被ばく線量をJ-PARCの結果と共に図示した。KEK-PS加速器が稼働した年から10年目までは、実験ホールでの中性子被ばくが、ビームライン周辺での作業によるガンマ線による被ばく線量と同程度で、200-300mSv人と、大きかった。一方、J-PARCではガンマ線の被ばく線量のみで30mSv人程度であった。ビーム強度が50倍以上異なる点を入れて、J-PARCでの被ばく線量は、KEK-PSに比べ、かなりの低減となっている。

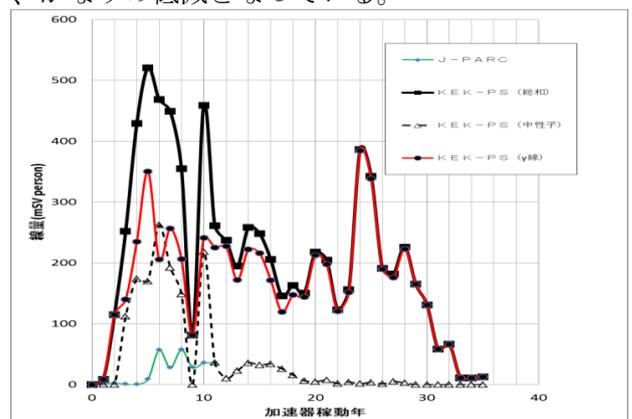


図10 KEK-PSとJ-PARCの加速器稼働年による被ばく線量の推移

4) 管理排気

放射線発生装置において、3か月間の空气中濃度の平均が濃度限度の1/10を超える施設では排気設備が義務付けられていて、管理排気が必要である。放射性核種の生成量は、実際に放射線に曝される空気層での放射線の飛跡長やエネルギーなどに大きく依存し、電磁石等の加速器構成機器の配置によってその見積もりが難しいこと、ま

た、ビーム損失の評価が容易でないことなどから、空气中放射能濃度を精度よく評価することは困難である。そのため排気設備などの設計は、かなり安全サイドに立った評価を基に行われているのが現状である。

施設室内空気では、放射線のエネルギーに依存して、 ^3H (半減期 12 年)、 ^7Be (53 日)、 ^{11}C (20 分)、 ^{13}N (10 分)、 ^{15}O (2 分)、 ^{41}Ar (1.83 時) 等が生成される。低エネルギー領域では主に捕獲反応により生成し、高エネルギーではそれに核破砕反応による寄与が加わる。高エネルギー中性子による放射化として、空中の窒素 N、酸素 O の(n,2n) 反応および核破砕反応(n,sp)により、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{11}C 、 ^7Be 、 ^3H などが生成される。これらの反応は全てしきいエネルギーが 15 ~ 20 MeV なので、20MeV 以上の高エネルギー中性子束密度で生成量が評価できる。熱中性子捕獲(n, γ)反応による ^{41}Ar の生成として、空气中に 0.93%含まれている ^{40}Ar の (n, γ) 反応による ^{41}Ar の生成を評価するためには、熱中性子束密度 Φ_{th} (n/(s \cdot cm 2))を使用する。加速器施設の熱中性子束密度は、経験的に以下の式から求めることができる。

$$\Phi_{\text{th}} = C \cdot Q / S$$

ここで、Q は発生中性子数(n/sec)、S は室内全表面積(cm 2)、定数 C は 1.25 から 4 である[11]。

^7Be はエアロゾルとして存在するのに対し、 ^3H 、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F は 98%以上がガスである。加速器室内の空气中に存在する放射性核種の生成源として、空气中の原子から生成されるもののほか、ターゲットや加速器構成機器から発生するものがあるので、ターゲット周辺の空気については注意を要する。

運転時も常時排気されている加速器室内では、標的核種の存在割合、生成断面積、半減期等の兼ね合いから、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O などの短半減期核種が主要な生成核種になる。これらの濃度は短時間の照射で飽和値に近づき、また、 ^7Be 等のエアロゾル以外は粒子フィルタによって捕集されない。そのため J-PARC などの大強度加速器では、排気中濃度限度との関係から、加速器運転中に室内空気を常時排気することが困難になる。

一方、運転中は室内の空気を密閉管理し、運転停止後減衰を待って室内への立ち入り、または排気を行えば、短半減期核種に基づく被ばくはほとんど問題とならない。しかし、空気を密閉した状態で長時間にわたり加速器を運転すると、(1) ^3H (半減期 12.3 年)や、生成量は少ないものの ^{14}C (5,730 年)など、半減期の長い核種が蓄積する、(2)換気されないために、生成されたエアロゾルが室内に沈着し表面汚染を生じる、(3)空気の放射線分解によって生成される窒素酸化物(NO_x)やオゾン(O_3)濃度が上昇し、加速器構成機器等が腐食、劣化する(後述)などが問題となる。したがって、大強度施設になるほど、1 次ビームおよび 2 次放射線に曝される空気量を極力少なくすること、また、室内の換気方法を工夫することなどにより、被ばく源となる放射性核種の生成量を低減すると同時に、これらに対する信頼度の高い線量評価法を確立することが重要になる。

前述のように J-PARC では環境への負荷低減もあり、運転中は排気しないで内部循環のみあり、運転停止後に、短半減期核種を減衰させた後、排気を行っている。排気は、浄化装置(ヘパフィルタ等)を通して、排気口(排気筒)から放射能を測定しながら行っている。J-PARC の排気設備において検出されている核種としては、空气中の組成元素から生じる ^3H 、 ^7Be 、 β^+ 核種(^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{14}O 、 ^{15}O) ^{41}Ar の他に、 ^{197}Hg 、 ^{82}Br 、 ^{125}I などがある。

トンネル内などへの入域には、作業環境測定としてダストフィルターによる空气中濃度の測定も行っている。加速器運転中はトンネル内空気を循環し除湿しているため、ドレン水中に空气中のトリチウムが含まれる。空气中のトリチウムが除湿水に含まれ、排水槽の水と一緒にするため、加速器では場所により、冷却水中濃度よりも排水槽内のトリチウム濃度が高いことが起こる。

中性子エネルギーに対する断面積データは少ないが、図 1-1 に一例として、中性子エネルギーに対する酸素からのトリチウム生成断面積を示す。

表 1 空気中に生成する核種の生成断面積 [12,13]

核種	半減期	断面積(mb)	
		N	O
H-3	12.3y	30	30
Be-7	53d	10	5
C-11	20min	10	5
N-13	10min	10	9
O-14	1.2min	-	1
O-15	2.1min	-	40
Ar-41	1.83h	610mb in Ar40	

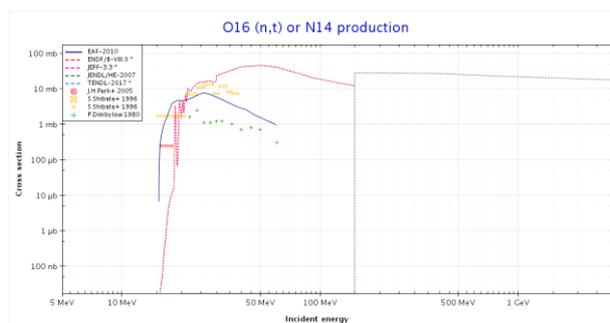


図 1.1 中性子エネルギーに対する酸素中に生成するトリチウムの生成断面積 [14]

5) 管理排水

多くの加速器施設の冷却系は密閉系で循環している。水の構成元素は、水素と酸素であり、生成量が多いのは ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{11}C である。運転中は排水しないため、酸素から発生する核種で排水時に問題となるのは、主に ^3H 、 ^7Be である。しかし、実測された排水中の放射能として ^{22}Na 、 ^{52}Mn 、 ^{54}Mn が検出される。これは放射化した冷却水配管（銅、ステンレス、鉄）の腐食等により冷却水中へ ^{22}Na 、 ^{52}Mn 、 ^{54}Mn 等の放射性核種が溶け込むためである。これらの核種は、冷却水システムのイオン交換樹脂で除去される。 ^7Be についても、かなりの程度、除去できる。水中の放射能は、空気の放射化と同様に粒子束と反応断面積から計算できるが、加速器室内の複雑な冷却水の経路

を計算体系に入れるのは困難であるため、既設の施設の測定値を元に評価することも多い。

加速器トンネル内で放射化した冷却水や除湿により回収した水は、排水槽に集め放射能濃度を測定した後、排水する。排水には、排水濃度限度が決められており、核種ごとの限度との比を取り、核種の比の和が 1 を下回ったことを確認し排水可能となる。つまり、1 核種の濃度限度を下回っても、他の核種の濃度が高ければ排水できない。また、濃度が高い場合には、排水可能な濃度限度以下となるよう、水で希釈する必要がある。

高エネルギー高出力の加速器では、排水槽の数、容積、希釈またはイオン交換樹脂除去、排水頻度（排水ごとに排水測定が必要）を考えて、排水設備を設計する必要がある。配管の腐食生成物の対策として J-PARC では、冷却水を脱酸素装置に通し配管の腐食を防いでいる。しかし、トリチウムについては、半減期が 12 年と比較的長く、イオン交換樹脂でも除去できない。トリチウム排水については、化学形によって排水中の濃度限度が異なるので注意を要する。たとえば、トリチウムでは純水については $60\text{Bq}/\text{cm}^3$ であるが、有機物では $20\text{Bq}/\text{cm}^3$ となる。排水濃度が高い場合には、適時全有機炭素計で有機物が含まれていないか確認する必要がある。J-PARC では、周辺環境への配慮から、排水時に濁度測定、PH 測定の測定を行い、値を確認してから排水を行っている。

6) 放射化物の取扱い

高エネルギー加速器施設の放射化物の取扱いで注意を要することとして、鉄やステンレス鋼の中に、トリチウム(β -崩壊、半減期 12.3 年)、 ^{55}Fe (軌道電子捕獲、2.7 年)、 ^{63}Ni (β -崩壊 100 年)などの、放出する放射線のエネルギーが極めて低く、また、 γ 線を放出しないため、検出が困難な放射性核種が生成されることがある。 ^{55}Fe 、 ^{63}Ni について、加速器トンネル (KEK-PS) で測定した例を図 1.2、1.3 に示した。図 1.2 は銅 1

g 中の生成核種、図 1 3 はステンレス鋼 1 g 中の生成核種の照射終了後の時間変化を示す。

いずれの核種も線量率への寄与は小さいが、生成断面積が大きく半減期が比較的に長いため、加速器停止後も長期間にわたって加速器機器等に残る。したがって、放射化物表面の線量率が減少しても、放射性核種が残っているおそれがあることを考慮して、加工にあたっては、使用履歴を把握しておくことや空气中放射能濃度の事前評価などが被ばく防護上重要になる。

現在のところ、放射化物の加工時における内部被ばく線量は、外部被ばく線量と比較して低く、無視できる場合がほとんどである。しかし、大強度加速器施設では、生成される誘導放射能が桁違いに増大することもあるため、放射化された機器等を不用意に加工すると、作業者が有意の内部被ばくを起こす可能性がある。

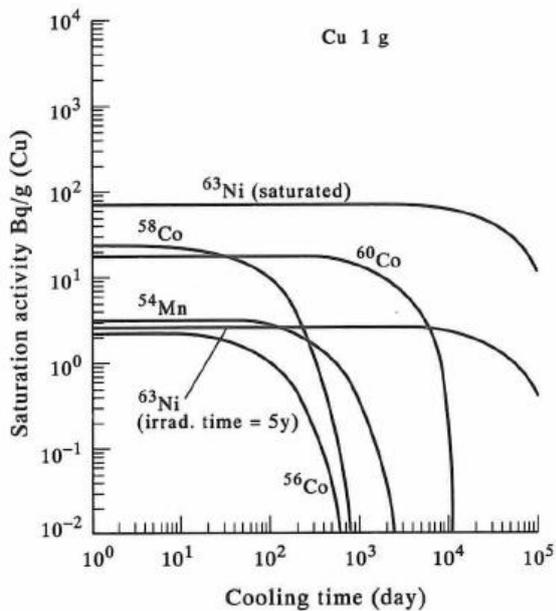


図 1 2 銅 1 g 中に生成した核種の時間変化 [15]

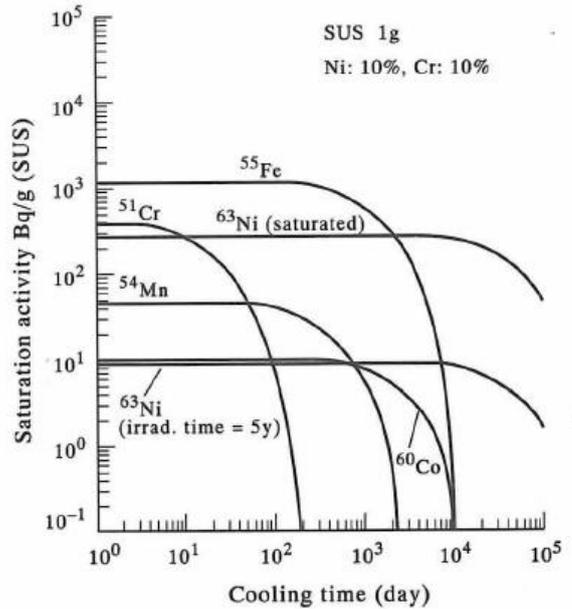


図 1 3 ステンレス鋼 1 g に生成した核種の時間変化 [15]

7) その他(放射線化学効果、環境への配慮)

加速器の運転中に発生する放射線は、核反応により放射性核種を生成する(放射化)と同時に、特異な化学反応を引き起こす(放射線化学効果)。高エネルギーの電子、陽子加速器施設の加速器トンネル内では、空气中に硝酸や亜硝酸などが生成する。これらの窒素酸化物類が金属製の加速器部品を腐食する可能性がある。放射線が高く機器の腐食を避けるためには、機器全体を遮蔽体を兼ねた空間として、中の空気をヘリウムで置換する等の対策が必要となる。

放射線照射により低分子量のガス状生成物が発生することが多い。放射線酸化反応が起こらない条件で、ポリエチレンを照射するときの発生ガスは、水素がほとんどである。種々の高分子でも水素が発生し、その他にその高分子を構成している元素に由来したガスが発生する。例えばポリ塩化ビニルであれば塩素水素、フッ素系高分子であればフッ素やフッ化水素と言った具合である。腐食性ガスが発生する場合には注意する必要がある。

また、水の放射線分解により水素が発生し問題となる濃度になることがある。J-PARC の MLF などでは、放射線分解により発生した水素と酸素を水に戻してシステムの圧力増加を防ぐ再結合器が接続されている。再結合器は一次冷却水から放射線分解により発生した水素と酸素を触媒により水に戻す装置である。再結合器はポンプ（金属ベローズ型）、加熱器、触媒筒及び冷却器で構成されている。

放射線損傷については、「高放射線場における加速器機器及び施設の安全設計ガイドライン」に詳しい記述がある[16]。

参考文献

[1] 放射線発生装置のインターロック及び安全設備に関するガイドライン、石井和啓 他、KEK Internal 90-1(1990)

[2] R. Serber, *Phys. Rev.* 72, 1114 (1947)

[3] Kufman and E.P. Steinberg, *Phys. Rev.* C22, pp167-177 (1980)

[4] J.T. Routti., *NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING*: 55, 41-50 (1974).

[5] G. Rudstam, *Z. Naturforschung*, 21A, 1027 (1966); *Nucl. Phys.*, A126, 401 (1969).

[6] Y. Oki et al., *Appl. Radiat. Isot.* 43, 1355 (1992) Fe-55

[7] J-PARC 安全管理年報(2014 年度) KEK Internal 2015-5, JAEA-Review 2015-038 (2015)

[8] Y. Asano et al., *Spallation of Tantalum, Tungsten and Gold 12-GeV Protons*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 57, pp.2995-3002 (1988)

[9] M. Noguchi et al., *Appl. Radiat. Isot.*, 42, 577 (1991) H-3

[10] M. Numajiri et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 255, 481 (2003) C-14

[11] T. Ishikawa, H. Sugita, T. Nakamura, *Health Phys.*, 60, 209 (1991).

[12] A.H. Sullivan `A guide to radiation and radioactivity levels near high energy particle accelerator` Nuclear Technology Publishing, p138 (1992)

[13] アイソトープ手帳 11 版、日本アイソトープ協会 (2011)

[14] JANIS Web
(*<http://www.oecd-nea.org/janisweb/>)

[15] M. Numajiri et al., *Appl. Radiat. Isot.*, 45, 509 (1994) Ni-63

[16] 高放射線場における加速器機器及び施設の安全設計ガイドライン、高崎稔、平山英夫編集、KEK Internal 97-17 (1997)

以下は、放射線管理で参考となる文献である。

高エネルギー加速器施設の放射線防護 柴田徳思 OHO1996

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 三浦太一 OHO2005

放射線物理計測基礎論 佐々木慎一 OHO2011

放射線安全 シールドと計算、岩瀬広 OHO2012

放射性核種の生成と放射線防護 松村宏 OHO2016

放射線の相互作用と測定 佐波俊哉 OHO2016

J-PARC 放射線管理年報(2011 年度) KEK Internal 2012-7; JAEA-Review 2012-050

J-PARC 安全管理年報(2014 年度) KEK Internal 2015-5, JAEA-Review 2015-038

J-PARC 安全管理年報(2015 年度) KEK Internal 2016-12; JAEA-Review 2016-032

J-PARC 安全管理年報(2016 年度) JAEA-Review 2017-033, KEK Internal 2017-009

渡辺愈 身近な物理学の歴史、東洋書店 1993
放射線遮蔽ハンドブック基礎編

大学等における放射線安全管理の実際 (大学等放射線施設協議会)

放射線安全管理の実際（日本アイソトープ協会）

付録

1.放射線発見の歴史、放射線・放射能とノーベル賞

今から約120年間で、X線をはじめとしてα線、β線、ガンマ線、中性子が発見された。簡単に歴史を振り返る。

1895年、レントゲンがX線を発見した。1896年、ベクレルは、ウランが放射線を放出するのを発見した。1897年、トムソンが、電子を発見。1898年、ラザフォードが、α線、β線を名づけた。ラザフォードは、気体の電気伝導に及ぼすX線の効果についてJ. J. トムソンとの共同研究を行った後、X線と放射性物質から放出される放射線は本質的に同じ振る舞いをすることを示した。また、彼は、U（ウラン）やTh（トリウム）などの天然の放射性物質から出ている放射線の物質による吸収の測定から、UやThから放出される放射線には性質の異なる少なくとも2種類のものがあり、1つは電離能力が非常に大きく、そのため物質に吸収されやすく、薄い紙でも止ってしまうが、もう1つは、これよりも電離能力が小さく、透過力が大きいことを明らかにした。ギリシャ語のアルファベットの最初の2文字を用いて、前者をα線、後者をβ線と命名した。この他にβ線よりもさらに透過力が大きい放射線も存在することが分り、それをγ線と名付けた（1903年）。

1902年、キュリー夫妻がラジウム塩を精製した。ラジウムが放射線を出している能力に「放射能」と名付けた。ピエール・キュリー/マリ・キュリー夫妻の名である単位名称、キュリー（Ci）は、ラジウムについては1g、ラジウム系列の元素については1gのラジウムと平衡にある放射性物質の量として定義された。国際放射能単位委員会（International Commission on Radiological Units）では、ラジウムに依存した定義を廃し、 3.7×10^{10} 壊変毎秒(Bq)という定義が採用された。

このため、ラジウム1gの放射能は厳密には1キュリーではない。

ラザフォードは、α線の質量/電荷比を求める端緒を開いた。測定精度を上げる努力を続けた結果、1906年にこの比が水素イオンの値の約2倍であることが分った。原子量が2の元素は存在しないから、水素に次ぐ軽い元素で、電荷が2、原子量が4のヘリウムイオンと考えれば辻褄が合う。こうしてα粒子が正の電荷を持つヘリウム原子核であることが分った。なお、1903年に、ある種の放射性物質からヘリウムが生成されることが見出され（ラムゼーとソディ；マギル大学）、ラザフォードらは、ラジウムの試料から放射されたα粒子を集めてその光スペクトルがヘリウムと同じであることを確認している（1907-1908年）。

ベクレルは、「ウランによって放出される放射線の一部（ラザフォードによってβ線と呼ばれた放射線）は、磁場によって曲げられ、その方向は陰極線と同じ向きである」と述べた（1899年）。

ラザフォードは、γ線がX線のように波長の短い光であると考えたが、このことは、γ線を結晶に当てたときの散乱を観測して、これからγ線の波長を測定することによって証明された（1914年、ラザフォード及びE. N.ダコスタ・アンドラード）。

1930年、ローレンスとリビングストンが加速器サイクロトロンを発明した。1932年、チャドウィックが中性子を発見した。その後もノーベル賞の受賞対象をみると放射線・射能に関係する発見や発明があった。

表A 放射線、放射能とノーベル賞

年	受賞部門	受賞者	受賞対象
1901	物理学賞	レントゲン	X線の発見
1903	物理学賞	ベクレル	放射能の発見
1903	物理学賞	キュリー夫妻	放射能の研究
1905	物理学賞	レーナルト	陰極線に関する研究
1908	化学賞	ラザフォード	元素の崩壊および放射性物質の化学に関する研究

- 1911 化学賞 キュリー ラジウムおよびポロニウムの発見とラジウムの性質およびその化合物の研究
- 1914 物理学賞 ラウエ 結晶によるX線の回折の発見
- 1915 物理学賞 ブラッグ父子 X線を用いた結晶構造の研究
- 1917 物理学賞 バークラ 元素の特性 X線の発見
- 1918 物理学賞 プランク 熱輻射の研究、エネルギー量子の仮説
- 1921 物理学賞 アインシュタイン 理論物理学の諸研究、特に光電効果の発見
- 1921 化学賞 ソディ 放射性物質の研究、同位体の起源と性質の研究
- 1922 物理学賞 ボーア 原子の構造と原子からの放射に関する研究
- 1927 物理学賞 ウィルソン ウィルソン霧箱の発明及び気体電離の研究
- 1927 物理学賞 コンプトン コンプトン効果の発見
- 1934 化学賞 ユーリー 重水素の発見
- 1935 物理学賞 チャドウィック 中性子の発見
- 1935 化学賞 ジョリオ・キュリー夫妻 人工放射性同位元素の研究
- 1936 物理学賞 アンダーソン 陽電子の発見
- 1936 物理学賞 ヘス 宇宙線の発見と研究
- 1936 化学賞 デバイ 双極子モーメントの研究、X線回折・電子線回折による分子構造の研究
- 1937 物理学賞 デビyson トムソン 結晶による電子の回折の発見
- 1938 物理学賞 フェルミ 中性子照射による放射性元素の研究、熱中性子による原子核反応の発見
- 1939 物理学賞 ローレンス サイクロトロン発明と改良、それによる人工放射性元素の研究
- 1943 化学賞 ド・ヘヴェシ 化学反応の研究における標識としての同位体の使用
- 1944 化学賞 ハーン 原子核分裂の発見
- 1946 生理学・医学賞 マラー X線照射による人工突然変異の発見
- 1948 物理学賞 ブラケット ウィルソン霧箱の改良、それを用いて核物理・宇宙線物理学における発見
- 1949 物理学賞 湯川秀樹 核力の理論研究に基づく中間子の存在の予言
- 1950 物理学賞 パウエル 写真による原子核崩壊過程の研究開発およびその方法による諸中間子の発見
- 1951 物理学賞 コッククロフト ウォルトン 人工的に加速した原子核粒子による原子核変換についての先駆的研究
- 1952 物理学賞 ブロッドホパーセル 核磁気の精密な測定における新しい方法の開発とそれについての発見
- 1951 化学賞 マクミラン シーボーグ 超ウラン諸元素の発見
- 1954 物理学賞 ボーテ コインシデンス法(同時計数法)による原子核反応とガンマ線に関する研究
- 1958 物理学賞 チェレンコフ フランク チェレンコフ効果のタム 発見とその解釈
- 1959 物理学賞 セグレ チェンバレン 反陽子の発見
- 1960 物理学賞 グレーザー 泡箱の発明
- 1960 化学賞 リピー 放射性炭素による年代決定法
- 1964 化学賞 ホジキン X線回折による生体物質の分子構造の解明
- 1967 物理学賞 ベーテ 原子核反応理論への貢献、特に星の内部におけるエネルギー生成に関する発見
- 1977 生理学・医学賞 ヤロー ペプチドホルモンのラジオイムノアッセイ法の開発
- 1979 生理学・医学賞 ハウンズフィールド

コーマック コンピュータを用いたX線断層撮影の開発

1985 化学賞 ハウトマン

カール 結晶構造を直接決定する方法の確立

1986 物理学賞 ルスカ 電子を用いた光学に関する基礎研究、特に最初の電子顕微鏡の設計

1994 物理学賞 ブロックハウス

シヤル 凝縮体の研究に用いる中性子散乱技術の開発についての先駆的貢献

2003 生理学・医学賞 ラウターバー

マンズフィールド

核磁気共鳴画像法に関する発見

2. 高エネルギー粒子による核破砕反応 (2 step model)

核破砕反応とは約 100MeV 以上のエネルギーを持つ粒子によって引き起こされる多数の二次粒子放出を伴う非弾性核反応である。エネルギーの十分高いハドロン(陽子、中性子など)が物質に入射すると、次の二つの段階の核反応が起こる。第一の段階は入射粒子が核内の個々の核子(陽子、中性子)と衝突する核内カスケードである。

1) 核内カスケード (第一段階)

衝突した入射粒子及びはじき出された核子のエネルギーが高い場合は、さらに衝突を繰り返す。この過程を核内カスケード (Intra-Nuclear-Cascade)と呼ぶ。

入射粒子のエネルギーが約 400MeV を越えると非弾性パイオン生成衝突が起こり始める。したがってこの段階では p、n、 π^+ 、 π^- 、 π^0 の放出があり、励起状態の残留核が作られる。この段階の放出粒子は、入射粒子の進行方向に強い角度分布をもっている。

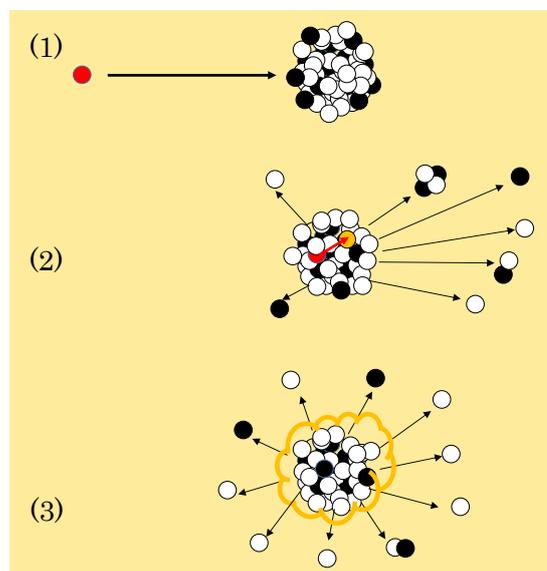
2) 蒸発過程 (第二段階)

核内カスケードが終了すると、核内にとどまった核子の持つ運動エネルギーは全ての核子間で平衡に達する。続いて第二段階として残留核からの核子の蒸発が起こる。この段階で放出される粒子のエネルギーは 0.1-10MeV と低く、等方的角

度分布を持つ。核子、特に中性子の放出は、d、t、 ^3He 、 α やさらに重い正の電荷を持つ粒子に比べ起こり易い。(中性子の少ない核種が生成されやすくなる。)

3) 残留核生成

粒子放出がもはやできなくなると、残留励起エネルギーはガンマ線として放出される。蒸発する荷電粒子はエネルギーが比較的低いので、それ以上核反応を起こすことはほとんどなく、減速し静止する。



図B

(1) 高エネルギー (100MeV以上) の陽子が原子核に衝突すると入射エネルギーが高いため原子核の深部に到達する。(2) 入射陽子が核内の個々の核子(陽子、中性子)と衝突する。この段階の放出粒子は、入射陽子の進行方向に強い角度分布をもっている。(核内カスケード：第一段階) (3) 核内カスケードが終了すると、核内にとどまった核子の持つ運動エネルギーは全ての核子間で平衡に達する。続いて第二段階として残留核からの核子の蒸発が起こる。放出粒子は、等方的角度分布を持つ。中性子の放出は、陽子等の正電荷を持つ粒子に比べ起こり易い。