小型加速器による大強度ソフト中性子源と その応用技術の開発



亀井 敬史 Kamei Takashi



古久保雄二 Kokubo Yuii ((株)京都ニュートロニクス)



敦彦 Hirai Atsuhiko



昭太郎 Izumi Shotaro

はじめに

我々の体のおよそ半分を構成しているにも関 わらず、普段、まず意識することのない存在が "中性子"である。意識することがないのは、 中性子が単独で取り出されることがほとんどな いためである。これに対して電子は、"電子レ ンジ"の名称に見るように、広く認知されてい る。電子が"エレクトロニクス"という産業を 生み出したように、中性子も本来、応用範囲は 広い。また、中性子でなければできないことも 多い。しかし、中性子が極めて有効に活用され ている例は,原子炉を除けばほとんどない。こ れは、中性子を産業利用が可能なほど容易に取 り出す方法が原子炉を除けばなかったことによ る。その中性子の産業利用を可能とするには, 任意に中性子の"発生量"や"エネルギー"を コントロールできなければならない。

中性子を生み出す方法として,加速器が利用 できることはよく知られていた。原子炉の実用 化と並行して,加速器を用いた中性子発生装置 (加速器中性子源) もこれまでに多種・多様に 開発されてきている。にもかかわらず、前述し たように、これまで加速器中性子源が世の中に 広く普及してきたわけではない。

加速器中性子源が産業界に広く普及するため

にはその製造コスト、運転コスト (効率)、運 用安定性(故障率),メンテナンス性(部品・ 原料の供給安定性),操作性(専門技術者の 要・不要)、安全性などが優れていなければな らない。本誌 2014 年 1 月号「利用技術」¹⁾ でも 特集されているように、近年、小型加速器を用 いた中性子源が注目を集めている。その小型加 速器中性子源が世の中に広く普及し得るかどう かは、前述の要求を満たしているかに左右され る。

本稿では、このような視点に立って新たに開 発している加速器中性子源 "TRANS(Tandem Repeat Accelerator Neutron Source: タンデム繰 返し静電加速器中性子源。トランスと発音)" を紹介するとともに、医療用アイソトープの生 産やがん治療への応用について述べる。

2 TRANS の概要

中性子を利用するに当たっては、①中性子の 量と②中性子のエネルギーの2点に着目しなけ ればならない。①については、中性子源として は単位時間当たりの発生率 (n/s) で評価する。 一般的に多い方が良い。②については、目的に 応じて冷中性子 (meV) から高速中性子 (MeV) まで、適したエネルギーがあるが、本稿で述べ るような幅広い産業応用という視点に立った場合には、一般的に数 MeV 以上の高エネルギー中性子は、放射化や不必要な被ばくなど目的以外の反応が生じるため、避けられる。しかしながら、既存の加速器中性子源は数 MeV 以上の中性子が発生するため、これを減速して利用している。中性子発生率が高くても、この減速の過程で利用可能な中性子数は減少するだけでなく、放射化された廃棄物も生成している。これらのことから、"目的に応じた比較的低いエネルギー(1 MeV 以下)の中性子を、必要な量だけ多く発生できる中性子源"が望ましい。

低エネルギーの中性子を発生させるためには、荷電粒子の加速エネルギーを低くすればよい²⁾。しかし、中性子発生数は加速エネルギーが低くなれば、それに応じて急速に減少する(図1)。もし加速エネルギーを低くするのであれば、荷電粒子数、すなわち電流値を大きくする必要がある。加速エネルギーと電流値の積はビーム出力であるが、電源の制約などから加速エネルギーが大きい場合、電流値は大きくできない。このトレードオフを考慮して、TRANS

では加速エネルギーを低くし、電流値を大きくすることで、低エネルギー(すなわち"ソフト")で中性子発生率の大きな(すなわち"大強度")中性子源を実現している。TRANSの基本構成を図2に示す。

TRANS は、①大電流イオン源(重陽子イオン。 数百 mA 以上),②ポリエチレン加速管,③ベリリウム・ターゲット,④ SiC 半導体スイッチング・モジュールで構成される。

イオン源から引き出さ

れた重陽子イオンは、ポリエチレン加速管に設けられた電極(マイナス)に引かれて加速される。電極は SiC 半導体スイッチによりマイナスとプラスを高速に切り替える。イオンビームが

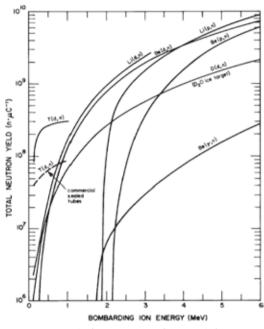


図1 加速エネルギーと中性子発生率

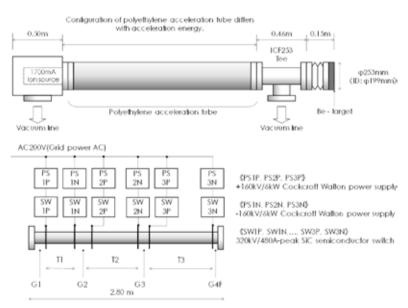


図2 TRANSの基本構成(加速管と電極)

電極に到達するとプラスに切り替え、これにより重陽子イオンは更に押し出されて加速される。スイッチの切り替え時間は40 ns 以内である。例えば1つの電極間の電位差を160 kVとすると、これを軸方向に3回繰り返すことで480 keV に加速できる。これが"タンデム繰返し静電加速"の意味である。

製造コストの低減には、利用する部品・材料の低コスト化や、製作に高度な技術を要求しないことなどが挙げられる。TRANSで採用しているポリエチレン加速管は加工性に優れるだけでなく安価である。構造は単純な円筒であり、純銅の微細加工などの高度技術を要さない。

運転コストの低減には、高い加速効率(消費電力とビーム出力の比)が求められる。現在、広く利用されている高周波加速器では加速効率は数%程度に留まる。TRANSで採用するSiC半導体デバイスはスイッチを入れた際の抵抗(オン抵抗)が小さく、またスイッチング速度が極めて速いため、大電圧・大電流を駆動してもロスは少ない。TRANSの加速効率は約60%である。SiC半導体デバイスを用いることで加速管の駆動デバイスをフル・ソリッド・ステート化したため、従来の真空管デバイス(クライストロン管)に比べて、機器の信頼性(故障率)を大幅に向上させた。さらに、現在採用し

ている単一のデバイス(ローム(株)製SCT2080KE)の耐圧は1.2 kVであるが(数百のデバイスの多直列・多並列回路により大電圧・大電流を駆動)、今後のデバイスの耐圧向上などにより、コンパクト化や低コスト化が容易に実現できる。真空管と異なり、半導体サプライヤーは世界に多数存在することから、部品の安定的な調達が可能であるなど、多くのメリットがある。TRANSでは、1本の加速管を"バレル"と呼ぶ。現在、開発を進めているTRANSのシングル・バレルでの仕様を表1に示す。

シングル・バレルでの中性子発生数が少なければ、複数の加速管を並列動作させることでトータルの発生数を増やすことができる。マルチ・バレルのもう1つの利点は、中性子源の幾何形状の自由度が高い点である。例えばスポレーション中性子源はポイント・ソースであり、これ以外の形状はない。TRANSのマルチ・バレルでは、1列に並べることで線状線源とすることや、これを並列にすることで擬似的な面状線源にすることができる。また環状に配置して、その中央部で高い中性子束を形成することもできる。さらに、各バレルの動作条件を変えることで、中性子束の空間分布を変えることもできる。

表1 TRANS シリーズの仕様

	項目	TRANS-960C	TRANS-480C	TRANS-200C
中性子源	エネルギー	960 keV	480 keV	200keV
	電流 (最大)	100 mA	150 mA	120mA
	ビーム出力 (最大)	96 kW	72 kW	24kW
	中性子発生率 (最大)	3.2×10^{12} n/s	8.7×10 ¹¹ n/s	1.1×10 ¹⁰ n/s
加速管	加速管数 (図2参照) パルス幅 ビーム引出電流 長さ	$4(T1 \sim T4)$ 40 ns $1,000 \text{ mA}$ $2,495 \text{ mm} + \alpha$	$3 (T1 \sim T3)$ 40 ns $1,000 \text{ mA}$ $1,430 \text{ mm} + \alpha$	1 (T1) 40 ns 1,000 mA 475 mm+α
高電圧パルス発生器	台数(図4参照)	4	3	1
	定格電圧	240 kV	160 kV	200 kV
	オフセット電圧	120 kV	-80 kV	100 kV
	繰返し周波数(最大)	2 MHz	2 MHz	2 MHz

3 ⁹⁹Mo 製造への応用

中性子をシリコンに照射すると 30 Si の一部が 31 Si となり、これが $^{\beta}$ 崩壊して安定な 31 P となる。これにより均一性の高い n 型半導体を製造できる。このように中性子を用いて不純物をドーピングする方法を NTD(Neutron Transmutation Doping)という。

NTD の手法は医療用アイソトープの ⁹⁹Mo の製造にも応用できる。 ⁹⁹Mo は現在,100%海外輸入に依存しており,かつ海外の生産用原子炉が老朽化や核拡散対策を理由に数年以内の停止が見込まれるなど,大きな供給不安に直面している。 天然 Mo には ⁹⁸Mo が 24%含まれる。これに中性子を照射すると ⁹⁹Mo に変わる(放射化法という)。減速材に軽水を用いた原子炉で天然 Mo を照射した場合,核分裂中性子はすぐに熱化され,熱中性子しか使えない。 ⁹⁸Mo の熱中性子の吸収断面積は 0.13 b と小さいため(図 3), ⁹⁹Mo への転換効率は非常に低い。例えば BWR で天然 Mo を照射して得られる ⁹⁹Mo の比放射能は 1~2 Ci/g(Mo)である。

現在、 99 Mo は高濃縮ウランの核分裂生成物から得ているが(核分裂法という)、その比放射能は $5,000\sim10,000$ Ci/g(Mo)である。このような大きな違いのため、軽水炉による天然Mo の放射化法は実用的には成立しないと考えられている。これに対して TRANS では減速材

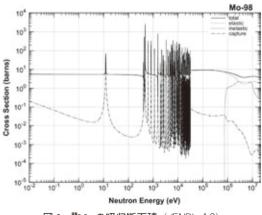


図3 98Moの吸収断面積 (JENDL-4.0)

に軽水以外を利用することができるため、フラットな中性子スペクトルを実現できる。その結果、%Moの共鳴吸収領域(図3)が活用でき、トータルの吸収断面積は6.5 bと実用的な値になる。

現在開発中のTRANSのプロトタイプ (TRANS-200C) の構成を図4に示す。これを用いた天然 Moへの照射による 99 Moの製造試験を(株)化研 (水戸市) と共同で行う計画である。

4 BNCTへの応用

中性子の医療応用でもう1つ期待される分野はがん治療である。がん治療には短寿命の α 線核種を製造・投与する放射免疫療法のほか、それ自体はがんの殺傷能力を持たないホウ素をがん細胞に選択的に取り込まれる製剤に添加して投与し、ここに中性子を照射してホウ素の核反応(α 線とリチウム核の放出)によりがん細胞を死滅させる BNCT (Boron Neutron Capture Therapy:ホウ素中性子捕捉療法)がある。近年の小型加速器中性子源への注目の高さは、BNCT 関連によるものが多い。

BNCT 用の加速器中性子源は医療機関に設置される。そのため安全性や操作性,運用性の高さがより求められる。将来の展望を考えれば,既存の建屋に設置できることが望ましい。中性子発生用ターゲットにはリチウムもあるが,中性子との反応によって放射性のトリチウムを生

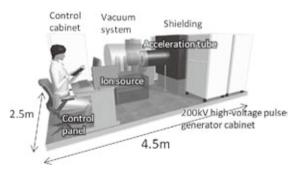


図4 TRANS-200C の構成図

成すること,水分との高い反応性を有すること などから、ベリリウムを用いるケースが多い。

BNCTでは不要な被ばくを避けるために高エネルギーの中性子は使えない。逆に中性子のエネルギーがあまり低いと体内への到達距離が短い。そのため熱から熱外中性子(~数十 keV)が用いられる。数 MeV 程度の中性子が発生する加速器中性子源は減速材を用いるが、発生する中性子のエネルギーが低ければ、減速材の体系を小さくでき、コストも低減できる。BNCTの治療時間は中性子の照射量で決まるため、中性子発生数は多い方がよい。これらの点から、大強度ソフト中性子源の TRANS と BNCT との親和性は高いと考えらえる。

他方、BNCTの成否はホウ素製剤に左右される。すなわち、がん細胞にホウ素製剤が集まるかどうかによって、健康な細胞の損傷を避けられるかが決まる。しかしながら、術後の生活の質(QOL)に優れる、浸潤がんや転移にも有効性が見いだせるなど、ほかの治療法に比べて多くの魅力があり、今後の発展が期待される。

5 まとめ

中性子の産業応用のうち、医療応用(アイソトープ製造とBNCT)について概観した。また、現在、開発を進めている大強度ソフト中性子源TRANSを紹介した。

小型加速器中性子源への関心の高まりの中で、あまり触れられることはないが、ターゲットとして用いられるベリリウムの供給安定性については配慮が必要である。現在の供給は米国と中国、そしてカザフスタンに限られる。今後、ベリリウムが大量に必要になると想像すれば、これらの国との良好な関係が重要となる。

本格的な小型加速器中性子源の産業化は緒に就いたばかりである。"既に加速器があるから,何かに応用する"のではなく,"○○をしたいので,そのための加速器を開発する"というスタンスが求められるであろう。

参考文献

- 1) 鬼柳善明, 他, *Isotope News*, No.717, 31-40 (2014)
- Hawkesworth, M.R., Neutron Radiography: Equipment and Methods, *Atomic Energy Review*, 15(2), 169–220 (1977)