



放射線医学総合研究所

速中性子発生用加速器システム (NASBEE)

放射線医学総合研究所 基盤技術部 須田 充

放射線医学総合研究所 基盤技術部、(株)ネオス・テック 萩原拓也

放射線医学総合研究所 基盤技術部 酢屋徳啓・濱野 毅

高田真志・今関 等

Neutron exposure Accelerator System for Biological Effect Experiments (NASBEE) is installed for research on the biological effects of fast neutron at the Low Dose Radiation Effects Research Building in National Institute of Radiological Sciences (NIRS). Biological researches, which observe neutron RBEs (Relative Biological Effectiveness), are important for radiation protection around several nuclear facilities and accelerators. This system is a 2 MV tandem electrostatic accelerator (high current coaxial tandetron), equipped with the multi-cusp ion source, which generates high current 4 MeV deuteron beam with maximum current of 0.6 mA. This accelerator produces the largest beam current over the world in this accelerator class. Neutron beams are produced by bombarding water cooled 3 mm thick Be target with deuteron ion beam, and the neutron energy spectra from thermal to 10 MeV. In addition, highest dose rate is approximately 2.2 Gy/hr with relatively low contamination of gamma-rays (< 17 %). Another characteristic of this facility is that there are two irradiation ports. One is in the SPF (Specific Pathogen Free condition) room where *in vivo* irradiation experiments using mice and rats can be carried out. Another room is for physic experiments

and *in vitro* experiments using mammalian cells. In the present study, we will show the dose rate, irradiation field, and its dose distribution.

Key words: accelerator, neutron beam, biological study, SPF, dose measurement

1. はじめに

茨城県東海村で1999年9月株式会社ジェー・シー・オーによる臨界事故(JCO事故)が発生した¹⁾。この事故を契機に中性子線の生物影響研究に関して強い関心がもたれるようになった。JCO事故で放出された放射線の中で中性子線の占める割合が高く、そのエネルギーは10 MeV以下で2 MeVにピークを持つスペクトルであったと考えられている。中性子線は低LET放射線と比べ生物影響が大きく、その効果にはエネルギー依存性があると考えられており、数MeV以下の中性子線は高いRBE(Relative biological effectiveness: 生物学的効果比)を持つといわれている²⁾。そのため放射線医学総合研究所(放医研)ではJCO事故におけるデータをもとに10 MeVおよび2 MeV以下の中性子線の生物影響に関する研究を開始するため、速中性子発生用静電加速器システム(NASBEE)を導入した。このNASBEEは、2 MeV以下の中性子線を使用して、生物影響についての研究をするために建設された。放射線以外の影響を抑えるためにSpecific Pathogen free(特定病原菌無感染:SPF)環境下で飼育されたマウス・ラットをSPF環境から搬出することなく照射を行うことができる照射室が設置された。

Neutron exposure Accelerator System for Biological Effect Experiments (NASBEE) at NIRS

Mitsuru SUDA (Department of Technical Support and Development, National Institute of Radiological Sciences)

〒263-8555 千葉市稲毛区穴川 4-9-1

TEL: 043-206-3459, FAX: 043-206-3514

E-mail: suda@nirs.go.jp

2. NASBEE システム

2.1 加速器

NASBEE の加速器本体には、インラインタンデム型静電加速器 (High Voltage Engineering Europa、HVEE 製)を採用した³⁾。従来のシェンケル昇圧回路方式のタンデム型加速器では高電圧 (昇電圧) の部分が加速管と 90 度の角度で接するようになっている、そのため加速器本体の外観は英文字の T 状になり設置スペースを大きく取らなければならなかった。インラインタンデム型静電加速器は、昇圧部を加速管と同軸に配置してあるため、外観は英文字の I 状で従来の T 状より少ないスペースで設置することができる。NASBEE の静電加速器は、高圧タンクの大きさが高さ約 2 m、全長約 4 m で絶縁ガスには SF₆ を 6 気圧で使用している。ターミナル電圧は最大 2 MV で、最大電圧時のリップル電圧は 385 Vp-p、電圧安定度は 300 Vp-p である。絶縁ガスの

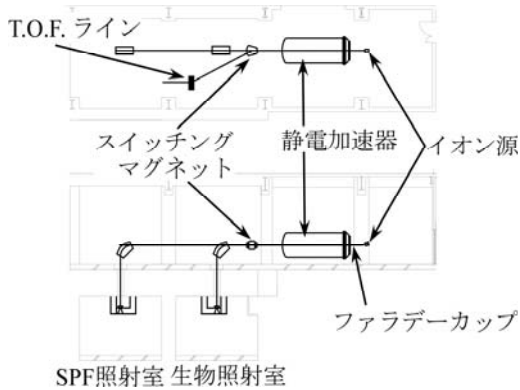


図 1 NASBEE の平面図及び側面図。照射室 2 室の内 SPF 照射室は SPF 環境下に管理されている。生物照射室もコンベンショナル環境

表 1 NASBEE の性能

| 特徴 | 内容 |
|--------------|---------------|
| 加速器形状 | 静電加速器 |
| 昇圧方式 | コッククロフト・ウォルトン |
| 最大ターミナル電圧 | 2.0 MV |
| ターミナル電圧の安定度 | 300 Vp-p |
| ターミナル電圧のリップル | 385 Vp-p |
| 絶縁ガス露点 | -60 °C |
| ビーム輸送効率* | 85 % |
| ビームサイズ* | 10 mm |

*Be ターゲット上

露点は常に -60 °C 以下になるように維持管理していることもあり、ターミナル電圧は大きな放電を起こすことなく 2 MV まで短時間で昇圧することが可能である。表 1 に加速器の仕様を示す。図 1 に加速器、ビームライン及び照射室の平面図及び側面図を示す。イオン源には小型マルチカスプイオン源を採用し水素または重水素ビームを大出力で発生させることができる。現在までに供給実績のあるエネルギー及び最大ビーム電流は、ターゲット上で水素では 4 MeV 時 800 μ A、重水素では 4 MeV 時 500 μ A、2 MeV 時 100 μ A である。表 2 に加速可能な核子、エネルギー、ビーム強度 (μ A) を示す。

表 2 核種毎のエネルギーと最大ビーム強度

| 核種 | 加速エネルギー (MeV) | 最大電流* (μ A) |
|-----|---------------|------------------|
| 水素 | 3.0 - 4.0 | 800 |
| | 1.5 - 3.0 | 100 |
| 重水素 | 3.0 - 4.0 | 500 |

*Be ターゲット上での電流

ターゲット位置でのビームサイズは、ターゲットの代わりに石英ガラス (直径 100 mm、厚さ 30 mm) を設置し、ビームを当て発光する光を観察して直径が約 10 mm であることを確認した。ビーム輸送効率は両照射室共に 85% である、ビーム輸送効率はイオン源の直下に設置されたファラデーカップとターゲットに照射され電流値より算出しているため荷電変換効率も含んだ値になっている。ターゲット電流はエレクトロメータ (617, Keithley Instruments Inc.) を使用し計測している。

NASBEE には 3 つのビームラインが設置されている。その内の 2 つは独立した照射室にビームを供給している。SPF 照射室は SPF 環境にコントロールされ *in vivo* の実験に使用されている。もう 1 つの生物照射室は通常環境に設置されており物理実験や *in vitro* などの実験に使用されている。SPF 照射室、生物照射室ともに中性子発生部や照射室内の設備などは同じにしたため、生物照射室での実験データを SPF 照射室へ容易に適応できるようになっている。3 つめのビームラインは加速器本体と同じ部屋に設置されており、TOF (Time Of Flight: 飛行時間法) を用いて、加速されたイオンのエネルギーを正確に評価する予定である。

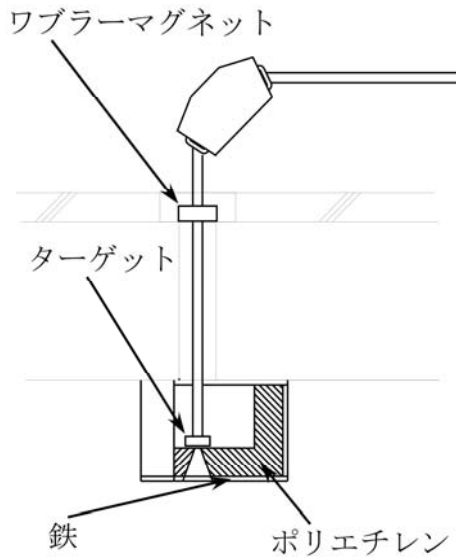


図 2 中性子照射システム及びターゲットシールド側面図。ベリリウムターゲットは厚さ 20 mm の鉄板と 380 mm のポリエチレンで構成されたターゲットシールドの中に収められている。

2.2 中性子照射装置

中性子照射装置はワブラーマグネット、ベリリウム (Be) ターゲット、ターゲットシールドで構成されている。図 2 に中性子照射装置の側面図を示す。中性子の発生は、ビームポートの終端に設置された Be ターゲットに加速された陽子あるいは重水素イオンが照射される際に起こる核反応 $\text{Be}(d,n)$, $\text{Be}(p,n)$ を用いている。また Li ターゲットも開発中で、 $\text{Li}(p,n)$ 反応によるエネルギー幅の狭い中性子の発生も予定している。NASBEE は加速電流が大強度であるため、ターゲット上に位置固定でビーム照射を行うとターゲットが熱破損してしまう。この対策として Be ターゲットの上流 2.2 m の位置にワブラーマグネットを設置した、これを利用しビームがターゲット上で直径 100 mm の円を描くようにビームを偏向し 50 Hz で回転をさせることによって、加速電流によるターゲットの発熱が一箇所に蓄積しないようにしている。

Be ターゲットは直径 120 mm、厚さ 3 mm、純度 90% の金属 Be を使用している。Be ターゲットの構成を図 3 に示す。ターゲットは破損した際に冷却水が真空中に漏れないように金属 Be を厚さ 3 mm の銅板に溶接し使用している。冷却水の層は 25 mm である。ターゲットの交換は容易に行えるように、冷却水配管にはウレタン製

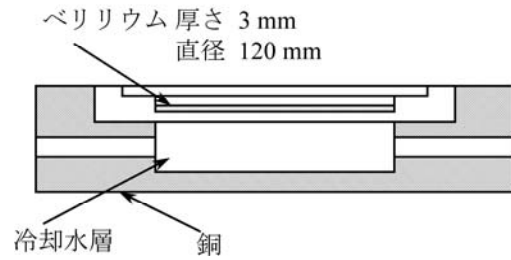


図 3 ベリリウムターゲット側面図。ベリリウムは厚さ 3 mm、直径 120 mm、純度 90% (銅製のプレート上に溶接されている、超音波を使用しベリリウムと銅プレートに剥離が無い事を確認している)。

のフレキシブルチューブを採用している。フレキシブルチューブは中性子線による劣化が考えられるためメンテナンスの際に状態を確認、硬化が確認されしだい交換を行っている。高フラックスの中性子線を得るために金属 Be ターゲットは 4 MeV の重水素を止めるのに十分な厚さを採用した、そのため γ 線も発生し照射線量に混入してしまうことが防げない状況である。

ターゲットは厚さ 20 mm の鉄板と厚さ 380 mm のポリエチレン壁で構成されたターゲットシールド内に設置した。ターゲットシールドの構造は図 2 に示す。ターゲットシールドはターゲットの放射化による照射室内の線量レベルの上昇や照射試料への γ 線の影響を抑える役目を担っている。また、ターゲットより発生した中性子をコリメートすることで照射室内に散乱する中性子線を減少させる効果を持たせた。照射時にはターゲット直下の γ 線シャッターが開き中性子を照射し中性子の照射が終わると γ 線シャッターが閉まりターゲットから照射試料への γ 線の影響を抑えるようにした。現時点で、1 日の総照射線量が中性子発生用ターゲット (中性子発生源) から試料までの距離 (STD : Source Target Distance) 1170 mm において約 4 Gy を超えると、照射室内の線量が入室可能なレベルまで低下するのにおおよそ 1 時間以上かかる。この間にも照射試料にはターゲットから放出される γ 線が照射されることになる。 γ 線シャッターは、このような照射試料への余分な γ 線の影響を低減させる目的で取り付けられている。また照射室に立ち入る際に作業者の被ばく線量の低減にもなっている。

3. 線量と線量分布

3.1 線量と線量率

線量測定には Far West Technology 製の電離箱 (IC-17A) を使用している。この電離箱は内容量 1 ml、組織等価プラスチックによる壁厚 0.05 inch、外径 20 mm のサイズで出来ている。電離箱からの電荷はエレクトロメータ (6517A、Keithley Instruments Inc.) にて測定を行っている。電離箱へは高圧電源 (556H、ORTEC) を使用し +410 V を印加している。IC-17A は放医研内の ^{60}Co γ 線源を使用し校正を行っている⁴⁾。したがって本文中で示す Gy は Co 等量での線量 (Gy) となる。線量測定は加速器の加速電流を $400\ \mu\text{A}$ で行っているため本文中での線量率は加速電流が $400\ \mu\text{A}$ 時のものになる。線量測定は IC-17A を照射台上に設置し、STD を 1170 mm に調整し行っている。その位置での線量率は $2.2\ \text{Gy/h}$ となっている。照射台を使用しての STD の調整は 710 mm ~ 1835 mm まで可能である。その際の線量率は $7.6\ \text{Gy/h}$ ~ $0.22\ \text{Gy/h}$ となる。STD の最大・最少位置での線量率、照射野を表 3 に示す。照射台は天板が厚さ 20mm のポリエチレン、架台部は MC ナイロンとアクリルで製作した。照射台からの後方散乱の影響は、IC-17A を、スタンドを使用してターゲットシールドに固定し STD 1170 mm に設置し照射台の有無で線量測定を行い、その差異を計測した結果、後方散乱の影響は 9% であった。また γ 線の混入は LET カウンタ (F.W.T. LET-1/2、Far West Technology) を STD 1170 mm に設置し計測を行い、17% の混入を確認した。NASBEE の LET、中性子エネルギー分布は現在評価中であり、後日報告する。

線量率はターゲットへ $400\ \mu\text{A}$ を基準としているが供給時にはビーム強度の変動で変わってしまう。平成 20 年度内での運転日に毎の線量率の安定度は供給実績で $\pm 15\%$ となっている。

表 3 各 STD 毎の照射野と線量率

| STD (mm) | 照射野直径* (mm) | 線量率 (Gy/hr) |
|-------------|----------------|----------------|
| 710 | 120 | 7.62 |
| 1170 | 240 | 2.2 |
| 1835 | 300 | 0.22 |

*平坦度 $\pm 2.5\%$ 時

3.2 照射野

ワブラーマグネットの使用・不使用における STD

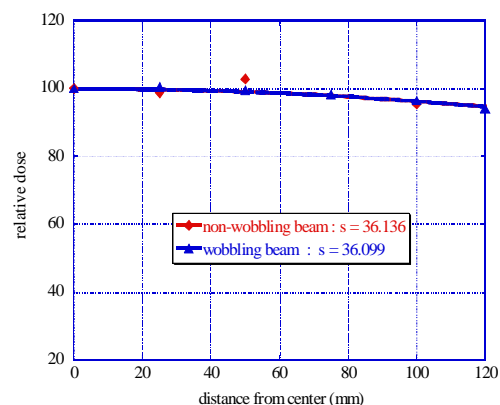


図 4 ワブラーマグネット使用・不使用時の STD 1170 mm でのビームプロファイルの測定結果。プロットはガウス曲線でフィットされている。

1170 mm でのビームプロファイルの測定結果を図 4 に示す。ガウスフィッティングを行った結果の標準偏差 (s) を図中に記載した。ワブラーマグネットの使用・不使用による大きな差異はなく、照射野への影響が無い事を確認した。照射野の測定はビームの光学上のセンターを (X, Y) = (0, 0) と定義して IC-17A を使用して行った。X 軸、Y 軸を 25 mm 間隔で IC-17A を移動させ位置毎にターゲットへ $3.0 \times 10^4\ \mu\text{C}$ のビームを照射して線量測定を行った。照射線量の $\pm 2.5\%$ を「平坦」と定義した照射野は STD 1170 mm において直径 240 mm と確認した。マウス照射で使用する照射ケージの大きさに十分な照射野を得られたため STD 1170 mm が NASBEE での線量測定の基準位置となっている。照射野の大きさについては照射台を使用して STD を変更することで容易に変更することができる。代表的な 3 か所の照射野を表 3 に示した。

4. 実験環境

高線量の中性子線照射実験では、試料の放射化問題がある。マウスを使用した実験では $0.5\ \text{Gy}$ 以上の照射を行うと放医研の放射線管理部門からの指導により管理区域外への持ち出しが制限されてしまう。そのため、放射線管理区域に指定されている SPF 照射室の手前の部屋に飼育ケージを収納する棚を設置しマウスのクール

ダウンを行っている。今年度までの実験では照射の翌日まで放射線管理区域内で飼育することでマウスが完全にクールダウンすることを確認している。また生物照射室を使用しているマウス実験では照射室内はコンベンショナル環境と同等に管理をしているが人の出入りの問題上クリーンベンチを設置しその中でマウスのクールダウンを行っている。In vitroの実験では培養液が放射化する、そのため放医研内の非密封 RI 使用施設である RI 棟内に実験室を設けた。RI 棟内の実験室にはインキュベータ、クリーンベンチ、コーンターカウンタを設置した。

5. まとめと今後の予定

放射線生物影響のための中性子照射システムを建設した。4 MeV 重水素と Be ターゲットを使用した Be(d,n) 反応による 2.0 MeV 中性子線で、線量率 0.88~7.6 Gy/h

の中性子線照射を可能とした。また SPF 照射室において 2000 匹を超えるマウス照射を行った。中性子の精密なエネルギー測定を行うための TOF ラインは現在開発中である。今後は我が国、唯一の高線量率の低エネルギー中性子線照射場として共用施設としての準備を行っていく。

参考文献

- 1) Tanaka, S., J. Radiat. Res. 2001, 42, S1-S19.
- 2) ICRP Publication 92, Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor (W_R).
- 3) Gott dang, A., Mous, D. J. W., Haitsma, R. G., Nuc. Inst. Meth. Phys. B 2002, 190, 177.
- 4) Mizuno, H., Kanai, T., Fukumura, A., Ishii, T., Sahou, S, Kusaki, Y., Medical standard dose, 2007, 12, 17-23 (in Japanese).