

## 大型加速器と小型加速器

## 北大 45 MeV 電子線型加速器とその中性子科学への応用

鬼柳 善明\*

## 45 MeV electron linac at Hokkaido University and its application to neutron science

Yoshiaki KIYANAGI\*

## Abstract

The electron linac at Hokkaido University still works well and it is used in various fields of the research although its age is more than 30 years. Here, I introduce briefly the activity using the linac concerning beam monitor, pulse radiolysis and parametric X-ray, and finally its application to neutron science field in more detail.

## 1. はじめに

北大で医療以外に使える加速器としては、最大加速エネルギーが 45 MeV、最大パワー 3 kW の線型電子加速器があるだけである。この加速器は 3 年の建設期間を経て、昭和 48 年度（1973 年度）に完成したものである。以来 30 年以上に渡って、電子およびそれを用いて発生する中性子などの 2 次粒子を利用した広い分野の研究教育が、この加速器を用いて活発に行われてきた。この加速器は多目的に使われているが、それは小型加速器として次に述べるような利点があったからと考えている。実験に合わせて条件が設定できる、パワーがあまり大きくないため線源の近くでの作業・装置の設置ができることがフレキシビリティを高めている。また、日常的に使用できるため、新しいアイデアに基づく試験的な実験が、研究の進展に合わせてできるというメリットもある。さらに、学生が身近でこのような加速器を利用することができるため、学生の教育と研究にも大いに役立つ。北大電子加速器は、こういう意味で、適度のパワーをもっていて、小回りがきき、非常に安定な加速器があったことが、今日まで有効に利用されてきた理由であろう。

ここでは、北大加速器で行われている研究の概要について簡単に紹介し、その後で、中性子科学に関する研究について少し詳しく紹介したい。

## 2. 北大加速器での研究

最初に、北大の加速器で行われてきた中性子科学以外の種々の研究の概要について簡単に説明したい。図 1 に北大加速器のビームラインの写真を示す。中央と右、左の 3 本のビームポートがあり、それぞれの場

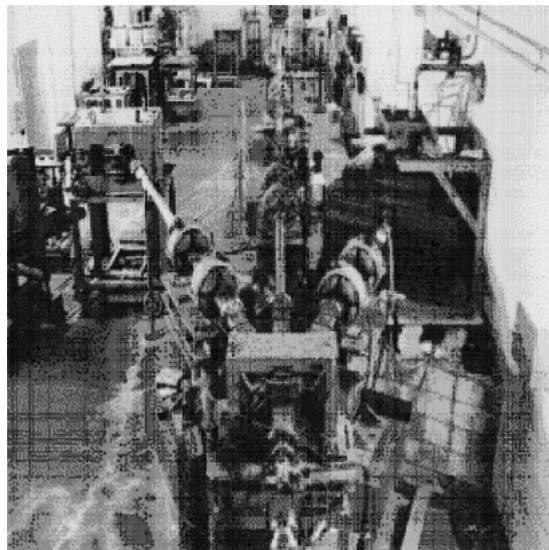


図 1 北大加速器のビームライン  
中央、左、右の 3 本のビームラインがある。右のラインには冷中性子源が常設されている。中央のラインでは、実験体系をその都度くみ上げて、種々の実験が行われる。左のラインでは、主として高速中性子の実験が行われてきた。

\* 北海道大学大学院工学研究科量子理工学専攻  
Division of Quantum Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University  
(E-mail: kiyanagi@qe.eng.hokudai.ac.jp)

所で独自の実験が行われている。右のラインには遅い中性子を発生するための冷中性子源が常置されている。

加速器ビームモニターの開発研究として、北大独自のスロットアンテナを用いた非接触型の電子ビームモニターの開発が行われている。通常はワイヤなどとビームを接触させてビームモニターにするわけであるが、ビームに接触しない構成で、電子ビームの位置や電流値について、細かい情報が得ることができるものである。最近では、ビームプロファイルの高時間分解計測の研究も進めている<sup>1-3)</sup>。

加速電子ビームを利用した研究として、パルスラジオオリシス法の展開がある。北大は日本で初めてマイクロ秒パルスラジオオリシスを行った実績があり、世界で初めて有機物の重合反応機構の解明を行った。その後、さらに早い時間の測定ができるナノ秒、ピコ秒パルスラジオオリシス法を開発し、水和電子の30ピコ秒の収量の決定などいろいろな成果を挙げている。現在、世界の指導的立場にある日本のパルスラジオオリシス研究の草分けであり、今日の、北大におけるこの領域の発展につながっている。最近ではCS<sub>2</sub>/Cl等に関する研究を行っている<sup>4-6)</sup>。

また、新しい単色エックス線源としてのパラメトリックエックス線の開発が、最近始められた。これは、電子線を結晶に当てると、エックス線が発生し、それが回折して単色のエックス線が発生するというもので、エックス線源とエネルギー選別器が一体になったようなものである。結晶の角度でエックス線のエネルギーを変化できることから、結晶などの特性評価、物質同定や物質選択的なエックス線撮影など種々の分野への応用が期待されている<sup>7,8)</sup>。

この他、高速中性子の最適遮蔽に関する研究、医学部、獣医学部の研究に関係して照射実験なども行われてきた。

### 3. 中性子科学への応用

北大電子加速器は設立当初から、中性子に関する研究を目指してきた数少ない小型加速器である。発生速中性子強度は、最大でおおよそ10<sup>12</sup> n/secのオーダーである。北大加速器ができたときには、既に東北大学核物理学研究所の電子加速器中性子源があった。しかし、エネルギーの低い中性子（冷中性子）を発生するための冷中性子源は設置されていなかった。北大では、冷中性子あるいはそれよりもっと低いエネルギーの中性子の重要性を早くから認識し、冷中性子源の開発に取り組み、20 K 固体メタン冷中性子源を開

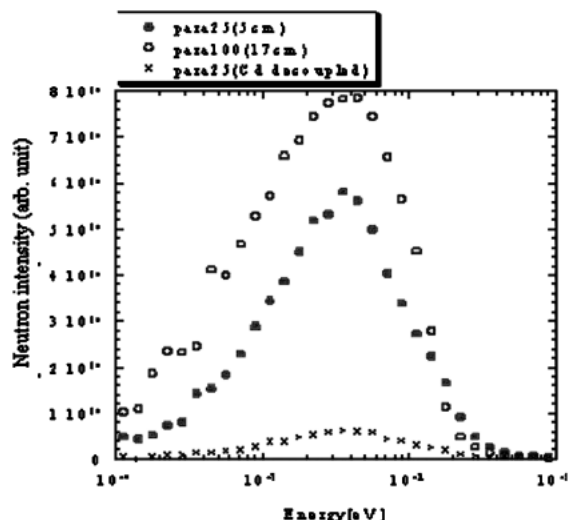


図2 J-PARC 中性子源用の液体水素減速材の開発  
一番強度が弱いのが従来型で、新しく開発したシステムは真ん中のカーブのように約6倍となった。さらに、パラ水素を使うことによって、一番上のカーブのように、1.5倍くらいの強度増が得られている。

発した。これは、中性子工学的特性が最も優れた冷中性子減速材で<sup>9,10)</sup>、北大加速器はこれを世界で初めて恒常的に使用する施設となっている。この減速材はその後高エネルギー加速器研究機構のKENS中性子源の冷中性子源として採用され、北大方式が移植されている。この北大減速材を利用して、中性子散乱実験用の準弾性散乱分光器を開発し、非破壊でセメントの硬化過程を調べる<sup>11)</sup>などの研究が行われた。さらに、これの発展型を3台KENSに設置し、これらはLAM型分光器と呼ばれて、非常に有用な装置として利用されている<sup>12)</sup>。

最近、日本とアメリカで大型の陽子加速器を使った核破砕中性子源の建設が始まっている。このような、大型中性子源では、メタン冷中性子源が放射線損傷等の問題で使用できなくなるため、新しいものの開発が必要となった。放射線損傷に強くて、比較的中性子強度が高い物質としては、水素しか現実的候補がない。しかし、水素はメタンに比べて、冷中性子強度が数分の1になってしまう。何とかJ-PARC中性子源の性能を向上させようとして、開発したのが図2の結果である。従来型（一番下のカーブ）に比べ、結合型と呼ばれる改良型（中央のカーブ）は約6倍の強度が得られている。この開発はもっぱら実験で行われた。その後、水素のオルソ、パラ濃度によって中性子強度が変わることが分かり、パラ水素を使って、大きな減速材にすることによって更に強度が増やせることが分か

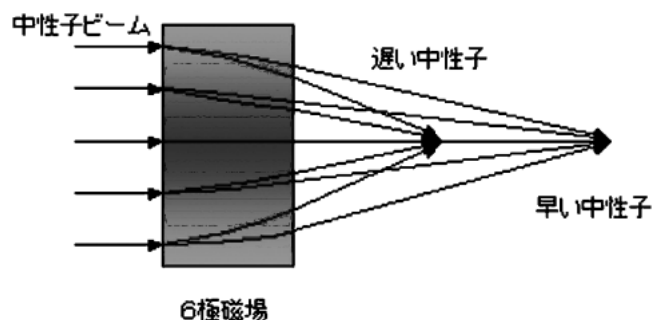


図3 6極磁場による中性子集束の様子  
磁場中で磁場に平行なスピンのもつ中性子が集束する。ここでは、平行スピンを持つ中性子の動きだけを示している。反平行のものは外側に広がっていく。

った<sup>13-15</sup>。これは、シミュレーションと実験で調べられているが、その結果、最終的には一番上の強度になることが分かった。現在、J-PARCに設置されている最も強度の高い減速材はこのタイプのものである。

また、中性子をより有効に使用するための方法として、中性子ビーム制御デバイスの開発も重要であり、このような研究は北大加速器のパワーに合っているテーマの一つである。新しいデバイスとして磁気レンズによる中性子集束がある。図3は6極磁場で構成された磁気レンズでの中性子の集束の様子を示したもので、磁場と中性子スピンの平行のものが集束軌道になり、反平行のものは発散になる。ここでは、平行スピンのものだけを示している。集束する位置は波長によって変わってくる。理研グループとの共同実験で、2 mの磁気レンズを用いた集束実験を初めて北大で成功させた<sup>16,17</sup>。そのときの結果が図4である。レンズの入口、出口に2 mm直径の穴があいたCdスリットを置き、そこを通過してくる中性子の強度を測った。この実験体系では約14 Åの中性子が集束波長になり、その位置で約40倍の強度増が得られているのが分かった。最近ハルバツタイプマグネットを使用してさらに高性能の磁気レンズが作られている。また、パルス磁気レンズによって、パルス中性子源からある波長範囲の中性子を一定位置に集束させるという研究も進められている。中性子ビーム制御に関しては、マルチキャピラリーファイバーを用いた中性子集束に関しても、その波長依存性について測定を行っている<sup>18</sup>。

中性子ビーム制御に関する研究を進めるうちに、2次元位置敏感型の検出器で飛行時間法での中性子エネルギー測定ができるものが必要であると痛感させられ

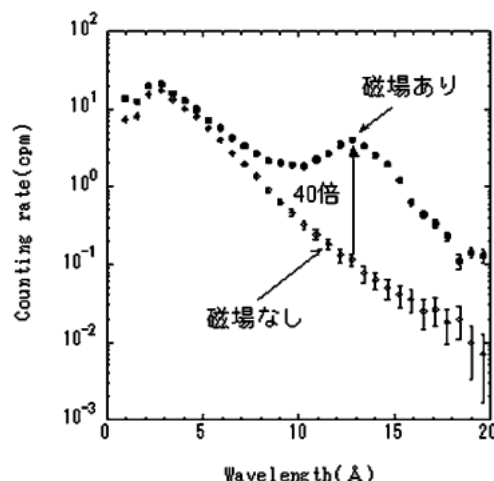


図4 6極磁気レンズによる中性子集束実験結果  
14 Åの中性子強度が集束効果により大きく増加しているのが分かる。

た。北大のようなパルス中性子源では、中性子が加速器電子パルスが打ち込まれた瞬間に発生すると近似できる。従って、中性子がある距離を飛ぶまでの時間を測定すれば、その中性子の速さ、即ちエネルギーが分かることになる(飛行時間法)。実際の測定では、電子パルスが打ち込まれてから、次のパルスが打ち込まれるまでの時間の中で、ある時間間隔毎に入って来る中性子の数を記録することになる。日本では、これまで、2次元位置敏感型検出器をパルス中性子源で使用したことはなかった。ファイバー型の空間分解能が0.5 mm角の検出器を作成し、それによって、飛行時間法を用いた中性子ラジオグラフィを初めて行った<sup>19</sup>。飛行時間法を使うことによって、それぞれの空間ピクセルのデータが飛行時間データ(即ち、エネルギー依存の透過率データ)も持つことになり、その場所の中性子断面積情報を、これから得られることになる。中性子断面積は物質特有の特長を持つため、それを分析することによって、物質の違いが容易に分かるようになり、また、物質の同定も可能になる。この検出器は空間分解能は良かったが、検出効率が悪かった。そこで、空間分解能を犠牲にして、検出効率が高く、最大計数率が高い検出器を、Liガラスを用いて開発した。この検出器の空間分解能は1.7 mm角で縦横8×8のピクセルがとれる。最大計数率は0.24 Mcps/ピクセルに達した。これによって、高強度の中性子場でも使用できるようになった<sup>20</sup>。これの応用として、ガラス容器に入れた鉛を液体状態と固体状態において位置依存でどのような構造変化があるかを調べてみた。図5は実験体系の概略を表したものであ

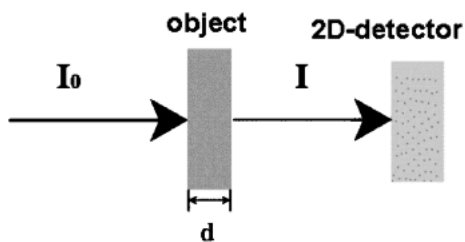


図5 パルス中性子を用いた中性子ラジオグラフィの体系  
被写体の透過スペクトルを2次元位置敏感型検出器で測定し、位置依存のデータを得る。

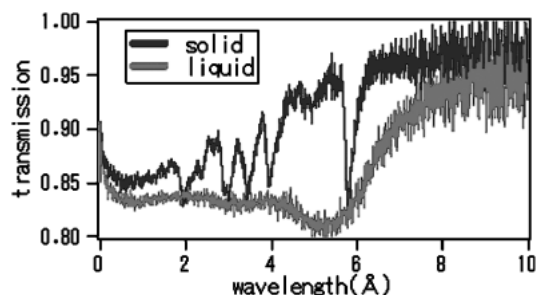


図6 液体と固体の鉛の透過率  
液体の透過率の変化はなめらかであるが、固体は鋭いピークがあらわれ、単結晶的になっていることを示している。

る。左から、強度  $I_0$  のパルス中性子が入射し、それが被写体を通して散乱、吸収され、 $I$  になる。散乱の仕方が中性子エネルギー依存であるので、それに応じた透過率の差が出てくる。単に画像をとるだけでなく、エネルギー情報（分光）も得られるので、中性子分光撮影法と呼んでいる。今回使用した鉛のサンプルは、内径9 mm のガラスの中に入れた。高さは60 mm である。検出器は横幅が20 mm 程度なので、一部は鉛の無いところの透過を測っていることになる。

図6に液体と固体の代表的な透過率を示す。ここで透過率は、 $Tr = I/I_0$  で定義される。また、これの自然対数をとった、 $-\ln(Tr)$  は中性子透過断面積に比例した量になる。これを対数透過率と呼ぶことにする。液体の透過率の変化はなめらかであり、液体の構造を反映したものになっている。しかし、固体にはディップがいくつも表れている。通常の数値ブックに載っている中性子断面積は、液体のものに近いものなので、今回のものは違った傾向となっている。これは鉛が単結晶的になっていることを示している。液体の透過率は位置による変化が殆どなかった。ここでは、変化があった固体について一例を示す。図7に4列目の8本の対数透過率データを示す。図に示すよう

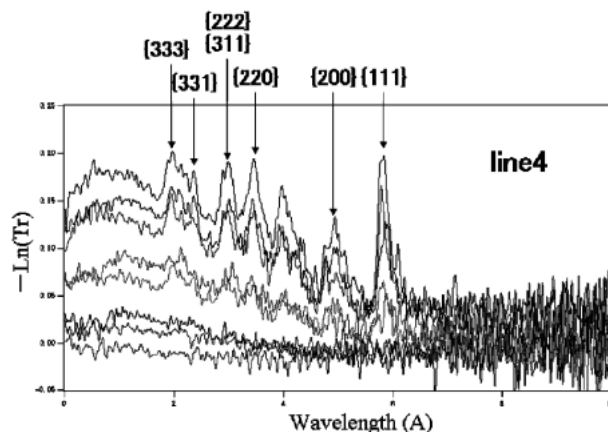


図7 位置による対数透過率の違い  
検出器の上から4番目の列の対数透過率の位置依存性を示している。結晶面も一緒に示しているが、場所によって、各面に対応するピークの強度が変化することが分かる。

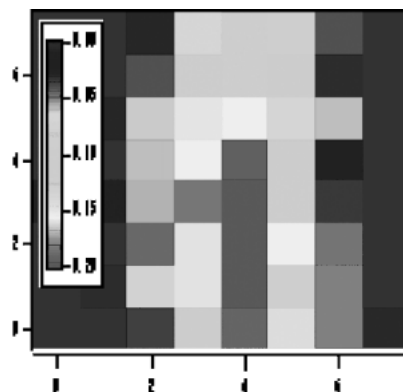


図8 {111}面のピーク付近での強度の位置依存性  
中央の上下をみると、場所によってこの面の表れ方が違うことが分かる。

に、鉛の結晶構造に対応した面にピークが表れている。しかし、 $3.9 \text{ \AA}$  のところのピークは、帰属が不明である。場所によって、ピークの表れ方が違っているのが分かる。{111}面について、場所によってその表れ方を濃淡でしめたのが、図8である。左右の端は鉛が無い場所であるので無視するとして、中央付近を上下に見ていっても、場所によって、この面の表れ方に違いがあることが分かる。同様のことが他の面についても観測されており、この手法は、簡単な結晶構造の分析法になることが分かった。この方法は、北大程度の強度の中性子源でも十分できるものであるし、また、この方法を発展させることによって、種々の情報が得られることも分かってきているので、簡便なマテリアルキャラクタリゼーション法として有用であると

考えている。

#### 4. 終わりに

小型加速器として北大加速器での研究について簡単に紹介したが、今、加速器の世界は大型化と小型（超小型）化の両極へ向かっているように見える。建設中の J-PARC のような超大型加速器はセンターとしての役割を担う、日本に一つできるかどうかというようなものである。一方、最近開発が盛んな小型あるいは超小型加速器は、大学レベルでも設置できるようになると考えられる。小型加速器と大型加速器の連携を考えた場合、小型加速器では独創的なテーマの創造や研究者の育成ができることが理想であり、アメリカでは建設中の大型中性子源の研究を支えるために、インデアナ大学に小規模中性子源が作られた。日本においても、小型中性子源への動きがあり、加速器開発と中性子源、ビーム輸送などのシステム開発が相俟って、小型で高性能な中性子施設をつくることを目指している。加速器が大学規模でも、新たに持てるようになるためには、上手い研究テーマと建設費・維持費の安い加速器が不可欠と思う。

#### 参考文献

- 1) 西山修輔, 富岡 智, 榎戸武揚: Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, 425-427 (2003).
- 2) T. Mogi, S. Nishiyama, S. Tomioka and T. Enoto: Proc. of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, 590-592 (2004).
- 3) S. Nishiyama, S. Tomioka, T. Enoto and T. Shintake: Proc. of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, 477-479 (2005).
- 4) T. Sumiyoshi, M. Nakayama, R. Fujiyoshi and S. Sawamura: Radiation Physics and Chemistry, 74, 317-322 (2005).
- 5) T. Sumiyoshi, M. Nakayama, R. Fujiyoshi and S. Sawamura: Radiation Physics and Chemistry, 75, 20-25 (2006).
- 6) T. Sumiyoshi, H. Minegishi, R. Fujiyoshi and S. Sawamura: Radiation Physics and Chemistry, 75, 195-200 (2006).
- 7) T. Yoshida, T. Akimoto, R. Nakamura, K. Sato, I. Murai, F. Fujita and Y. Shimazu, et al.: J. Nucl. Sci. Tech., Supplement 4, 314-317 (2004).
- 8) T. Akimoto, T. Yoshida, R. Nakamura, K. Sato, I. Murai and F. Fujita: Radiation Physics and Chemistry, 71, 643-645 (2004).
- 9) 井上和彦, 岩佐浩克, 鬼柳善明: 日本原子力学会誌, Vol. 21, No. 11, pp. 865-875 (1979).
- 10) K. Inoue, Y. Kiyonagi and H. Iwasa: Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, Vol. 192, No. 2, 3 pp. 129-136 (1982).
- 11) 井上和彦, 鬼柳善明, 坂本幸夫: 日本原子力学会誌, Vol. 22, No. 3, pp. 189-195 (1980).
- 12) K. Inoue, Y. Kiyonagi, H. Iwasa and Y. Sakamoto: Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, Vol. 178, No. 2, 3, pp. 459-468 (1980).
- 13) Y. Kiyonagi, N. Watanabe and H. Iwasa: Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, A312, pp. 561-570 (1992).
- 14) Y. Kiyonagi, N. Watanabe and H. Iwasa: Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, A343, pp. 558-562 (1994).
- 15) Y. Kiyonagi, M. Ooi, H. Ogawa and M. Furusaka: Journal of Neutron Research, vol. 11, No. 1-2, pp. 3-11 (2003).
- 16) H. M. Shimizu, H. Kato, T. Oku, Y. Suda, Y. Ogawa, H. Iwasa, T. Kamiyama, Y. Kiyonagi and T. Wakabayashi: Physica B241-243, pp. 172-174 (1998).
- 17) H. M. Shimizu, Y. Suda, T. Oku, H. Nakagawa, H. Kato, T. Kamiyama, C. Otani, H. Sato, T. Wakabayashi and Y. Kiyonagi: Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, A430, pp. 423-434 (1999).
- 18) Y. Kiyonagi, T. Tatsumi, H. Iwasa, F. Hiraga and T. Kamiyama: Physica B 350, e691-e693 (2004).
- 19) N. Sakamoto, Y. Kiyonagi, S. Sato, H. Sagehashi, M. Furusaka, J. Suzuki, K. C. Littrell, C. K. Loong, A. Gorin, I. Manuilov, A. Ryazantsev, K. Kuroda, K. Sakai, F. Tokanai, T. Adachi, T. Oku, K. Ikeda, H. Miyasaka, S. Suzuki, K. Morimoto and H. M. Shimizu: Journal of Applied Crystallography 36, pp. 820-825 (2003).
- 20) K. Mizukami, S. Sato, H. Sagehashi, S. Ohnuma, M. Ooi, H. Iwasa, F. Hiraga, T. Kamiyama and Y. Kiyonagi: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 529, 310-312 (2004).