

Current Status of the Hokkaido University Electron Linac Facility

Pulsed Electron Linac Experimental Facility,
Faculty of Engineering, Hokkaido University
Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-8628,

Abstract

We have a 45 MeV-30 μ A electron linac at the Faculty of Engineering, Hokkaido University, which has been operating since 1974. It has a very high performance pulsed-neutron source with a solid-methane cold moderator at about 17K. It is very suitable for developing neutron optical devices, such as focusing mirrors, monochromators, neutron-detectors and novel neutron instruments that make full use of such new devices. One is an energy selective neutron imaging technique; we can extract crystallographic information pixel by pixel. Also under development is a very compact small-angle neutron scattering instrument that utilizes an ellipsoidal neutron-focusing mirror.

The facility is also used for other purposes; i) we are studying short-time chemical reactions at an excited state using a technique based on pulse radiolysis coupled with a successive pulsed-laser irradiation; ii) we are developing a very fast electron-beam profile measurement system that uses an OTR screen combined with a fast-shuttering imaging device.

北海道大学電子線形加速器施設の現状

1. 電子線形加速器の概要

この施設は、45MeVの電子線形加速器（以後この文章の中ではHU Linacと呼ぶ。）を基とした施設であり、北海道大学大学院工学研究院運営の共同研究施設として運営されている。写真を図1に示した。正式名称は瞬間強力パルス状放射線発生装置である。主として1) パルス中性子源としての利用、2) パルスラジオリシスの研究、3) ビームプロファイルの測定手法開発に用いられている。中性子源として利用するときには、35MeV-30 μ A、1kW、3 μ sec幅のパルス、50ppsで運転されている。

加速器は1973年にはコミッションをはじめ、1974年に完成した45MeV電子線形加速器であり、様々な部品の老朽化はあるものの、保守作業のおかげで加速器本体はほとんどそのままの状態ですべて稼働している。加速器本体の写真を図1に示した。利用者側に取ってはほとんどターンキーシステムと言って良いような状況で、大学の環境の中で研究、教育に非常に有効に利用されている。ターゲット室



図1：45MeV電子線形加速器本体。一番奥に電子源、その手前に3本の加速管、左側の壁から来る導波管が見えている。

の写真を図2に示した。この右側の壁の反対側に中性子などの利用のための実験室がある。

2. 小型加速器中性子源の草分け

加速器中性子源の開発研究の場として世界的に見ても非常にユニークな施設である。本格的加速器ベースの核破砕型パルス中性子源の最適化、特に様々な冷中性子源の評価は世界に先駆けてここで行われている。また、そのような開発研究が継続的に行われている施設はここしかないと言っても良い状況である。

最近では世界の最先端に行く大強度陽子加速器施設の中性子施設が稼働を始めているが、大型施設では研究用のマシンタイムが優先され、落ち着いてデバイス、実験装置の開発をするには向かない。それに対してこのような小型加速器中性子源は、ビームラインまわりを自由に変更することが容易であり、場合によっては中性子パルス周期を10pps、あるいは1pps程度まで変更するようなことも容易にでき、研究手法の開発を行う場としてますますその重要性を増している。

さらに最近では、実験室X線発生装置に匹敵するような小型中性子源の必要性が認識されつつある。



図2：ターゲット室。右端から入射した電子ビームは3つのビームラインに振り分けられる。中央右側には固体メタン冷中性子源、左側にはJ-PARCの中性子源のモックアップが見えている。中央部では熱・熱外中性子源、ラジオリシスの実験が行われている。

このような小型線源でも、材料評価などには十分に使用でき、さらに中性子実験装置を簡単に実験ごとに最適化出来ることから、大型施設ではやり難い研究でもこのような施設では出来る可能性がある。例えば最近では、装置を中性子小角散乱の運動量変化の大きな領域を測定するような配置に最適化して使用することで、鉄鋼材料中のナノ構造を1-2時間の測定で十分に測定できることが確認されている。

最近になって、このような小型加速器中性子源 (cADNS: compact Accelerator Driven Neutron Source) が世界的にも注目を集めるようになってきている。米国のIndiana大学のLENSプロジェクトがその代表的な例で、すでに運転を開始している。京都大学でも小型陽子加速器の建設が始まっている他、中国の精華大学でも加速器の建設をはじめていて、北海道大学と協力して中性子線源の開発を行なおうとしている。

cADNSはまた、超小型の原子炉と考えることも出来、原子力関連の教育には最適なものである。電子(あるいは陽子)ビームが鉛などのターゲットに照射されると速中性子が発生する。これはUの核分裂で発生する速中性子とほとんど同じエネルギー分布を持つものになる。水の減速材で中性子を減速し、黒鉛の反射体を持つので、まさに原子炉そのものといっても良い。

HU Linacは非常に古い加速器ではあるが、小型加速器による中性子源の草分けとして、特に小型加速器に最適化された中性子源開発、中性子実験装置・デバイス開発、cADNSで行える実験など、モデルケースとして新たな価値が再認識されてきている。

さらにcADNSとしてこの施設の更新をどうするかという検討が始まっている。高エネルギー加速器研究機構の加速器の専門家と、cADNSとして最適な加速器の検討をはじめている。どの程度の中性子強度、パルス幅が必要か、それを実現するための加速器としては電子加速器が良いのか、陽子加速器が良いのか、ターゲット、中性子減速材の選択との関連で加速エネルギー、電流、繰返し周波数などの検討が必要である。実験室中性子源としてのモデルケースとなることを目標としている。

3. 新手法である中性子エネルギー分析型イメージングの開発

中性子を用いたイメージングは古くから用いられている標準的な手法である。しかし、最近になって、パルス中性子源で中性子飛行時間法 (TOF) を用いることにより、検出器のピクセル毎の透過スペクトルを一挙に測定することが出来、それをもとに多結晶の結晶子に関する様々な情報を引き出すことが出来るということが明らかになりつつある。北大ではHU Linacを用いてそのような研究を行なっており、開発の先頭を走ってきている。

鉄、ニオブなどの金属材料の溶接箇所の測定が行われ、図3に示すように結晶子サイズの分布イメージング、さらにはその配向角度まで分かるように

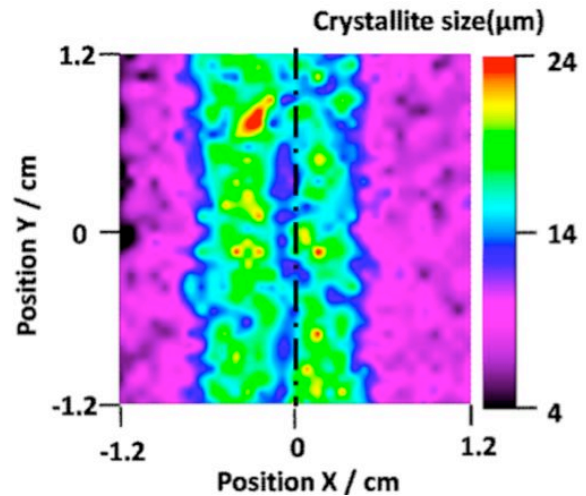


図3: 溶接したNbの結晶子サイズ分布。中央部分の結晶子の大きさが大きく、緑色に見える部分が溶接部である。

なってきている。これは通常のイメージングでは溶接箇所がほとんど見えなかったものである。この手法は液体と固体を見分けることも出来、その適応範囲はかなり広く、今後もさらに多くの情報が引き出せるようになる可能性がある。

4. 様々な中性子光学素子開発に最適

また、HU Linacでは様々な中性子光学素子の開発が行われている。

例えば6極電磁石の磁場勾配によりスピンを持つ中性子は、そのスピン配向に依存して集束あるいは発散する。パルス中性子源では刻々と違う速度 ($\propto 1/\text{波長}$) の中性子磁石を通過するため、ビームが検出器上で集束して、最もビームスポットが小さくなるのはある速度の中性子だけである。励磁電流を時間変化させ、速度の広い範囲にわたって集束をさせることが出来る。簡単なLCR放電による時間変化する電流でも、永久磁石による6極磁石と組み合わせることで、かなりの速度範囲のなかで一定とみなせ



図4: 青い筒の部分がパルス6極電磁石の本体である。

るような集束をすることに成功している。これを図4に示した。

図5に示したのはガラス基板の上にスーパーミラーを成膜したものを湾曲させることにより中性子を集束するためのデバイスである。このような簡単なデバイスでも中性子を集束させることができるが、最近になって、10-20gというさらに弱い力で正確に楕円筒形状に変形させることが出来ることが分かり、1mm程度まで中性子を集束することの出来るデバイスとなっている。

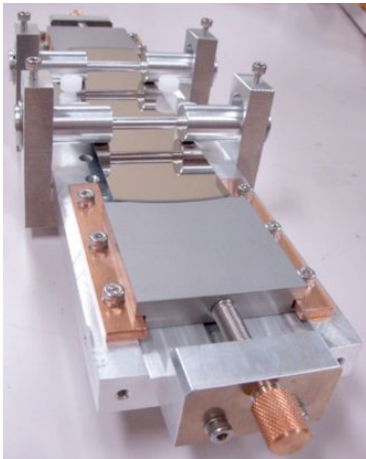


図5：中性子スーパーミラー湾曲装置。中央部にあるのがSiウエハに成膜された中性子スーパーミラー、両側に非常に角度の浅い楔状の部分があり、これを押しこむことでミラーが変形する。

図6に示したのは完全結晶であるSiを湾曲して中性子を単色化するデバイスである。X線と違って中性子線は10cm程度のSiであれば問題なく透過できるが、Bragg条件を満たせば100%反射出来るという素晴らしい性能を持っている。Siを湾曲させることにより、湾曲度に比例した波長分解能をもった高性能の単色化デバイスとすることが出来る。しかし、冷中性子を大強度で準単色化するような応用には向いていないと思われてきた。しかし、Si結晶を0.5mm厚にすることで、湾曲半径を2m（図の左側）あるいは0.7m（図の右側）とこれまでに考えられないような強い湾曲をさせることが可能になった。このようなデバイスの基礎開発研究においてもTOFで中性子のエネルギー変化というもう一つの次元の測定が出来るこの施設は非常に強力な開発環境を提供できる。

さらに検出器の開発においても最適な環境を提供できる。高分解能の検出器を開発するためには、単位面積あたり、それなりの中性子束 ($>10^3 \text{ n/cm}^2/\text{s}$) を持った線源で、幅広い波長領域の中性子があり、それが校正されているような中性子源が必要である。さらに、検出器開発がある段階になったときに直ぐに測定できる自由度がほしい。HU Linacはまさにそのような環境を提供でき、幾つかの検出器開発の共同研究プロジェクトが行われている。GEMに薄くホ

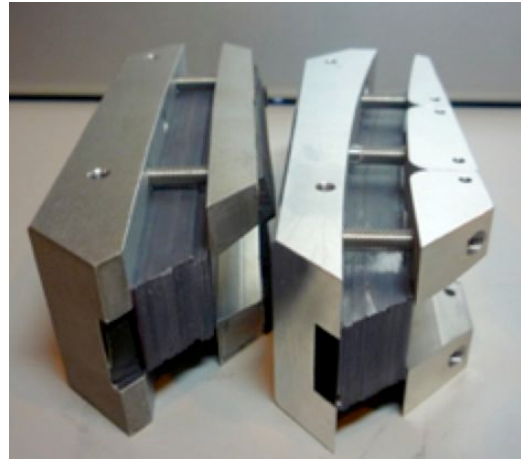


図6：開発中の強く湾曲したSi完全結晶によるモノクロメータ。左側は湾曲半径2m、右側は0.7mのもの。Siは0.5mm厚のものを30枚重ねたものである。

ウ素を塗布し中性子コンバータとして用い、別のGEMで電子増幅をするタイプの高位置分解能2次元検出器の開発がKEKで行われ、試験がHU Linacで行われている。さらに、中性子散乱の標準的検出器として用いられているHe-3ガス検出器（linear position sensitive detector, LPSD）を様々な形状にした時の性能チェック、クエンチガスの選択などの開発研究にも用いられている。

5. 中性子光学素子開発で変化する中性子実験装置

このような光学素子、1mm程度の位置分解能を持つ検出器を使うことでこれまでの常識的な中性子散乱実験装置とは異なったものを開発することが出来る。例えば中性子小角散乱装置に関して言えば、必要な中性子束強度を得るためにビームの断面積は10-20mm角が、また、試料の体積も散乱強度に比例するため、10mm×10mm×2mm程度の試料を用いた測定が行われている。このような大きさでも0.1度程度の分解能で角度を測定するため、装置の全長は10-30mが必要になっていた。

これに対し、中性子を集束できるような、例えば回転楕円体の一部を切り取ったような中性子スーパーミラーで出来た集束ミラーを用いることにより、試料の大きさはそのまま、装置の全長だけを約1/10にすることが出来ることになる。これは6極磁石を用いた中性子磁気レンズを用いることでも実現できる。

このような発想のもとに、現在全長が2.5mとこれまでの同様の装置に比べ長さが1/10程度の装置の原理検証実験をこのHU Linacで行い、この原理が正しいことを実証した。さらに、実用化につなげるため、日本原子力研究開発機構に小型集束型の中性子小角

散乱装置を設置、現在コミッショニング中である。この装置は原子炉の装置であるため、中性子を単色化する必要があるため、図6で示したモノクロメータを利用する予定である。さらに中性子強度を稼ぐために、中性子ビームの垂直速度成分を中性子ミラーで大きくすることで、これを進行方向の速度分布に位相変換する原理の新たなデバイスを開発している。これによりビームの発散角が小さく、進行方向の速度分布が大きい、したがって中性子強度が高いビームを取り出すことができる。

6. パルス・ラジオリシスの研究

パルス状の放射線を試料に照射し、短寿命化学種の生成過程を時間経過と共に追跡する「パルスラジオリシス法」が用いられる。この手法により、放射線が引き起こす超高速物理化学現象を、光の放出や吸収という形で観測することが可能となる。このパルスラジオリシス法とレーザー照射を組み合わせた電子線・レーザー逐次多重照射法の原理を図7に示した。

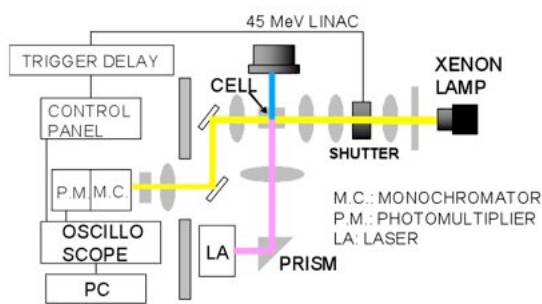


図7：パルスラジオリシス・レーザーフラッシュフォトリシス法

これを用いて、短寿命化学種の励起状態における反応ダイナミクスの解明や新規反応の探索を行っている。最近では、ピリジンの四塩化炭素溶液に対する電子線照射によって生成した「ピリジン-C1コンプレックス」が μsec オーダーで減衰する様子や、レーザー照射で励起されたこのコンプレックスの光吸収が急激に減少（光ブリーチ）する様子を実際に観測・解析を行った。また、16 nm以下の半導体加工プロセスで用いられる次世代リソグラフィである極端紫外光（EUV）露光源用のレジスト材料への電子線などの量子ビームへの反応応答性を明らかにするために、産業応用に向けた研究も行っている。

7. 加速電子のマイクロパルスごとのビームプロファイルを測定するための研究開発

加速器のマイクロパルス毎のビームプロファイル

を測定するために、10nsec程度でそれを画像化出来る装置の開発を行っている。これは図8に示すように、分割された透明電極を、それぞれ別々の時間に高速でシャッターリングすることにより、非常に早く変化している加速ビームのマイクロパルス・プロファイルを観測できるようにしようというものである。非常に反応時間の早い遷移放射光（OTR）を出すスクリーンと、この高速撮像手法を組み合わせることでマイクロパルスの観測を行うことが出来る。スクリーンに関しては、通常のものでは指向性が高くなりすぎ、ビームプロファイルの観測が困難になっている。このため、OTRスクリーンの表面粗さを荒くすることによりOTR発行角度分布を大きくする開発を行っている。これにより、カメラ側の設置自由度が大きく増している。

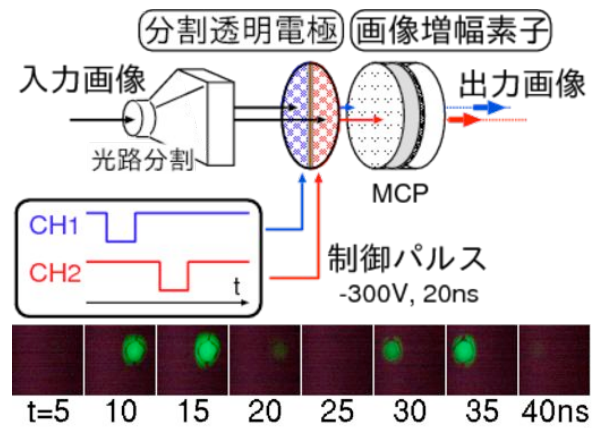


図8：分割透明電極を、時間差を持った駆動パルスで駆動することで実現した高速シャッターリング回路（上）と、20nsec間隔でシャッターリングして取った画像（下）。