

若狭湾エネルギー研究センターの加速器施設の開発と応用

THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF ACCELERATOR SYSTEM AT THE WAKASA WAN ENERGY RESEARCH CENTER

羽鳥聡^{#, A)}, 栗田哲郎^{A)}, 林豊^{A)}, 山田裕章^{A)}, 高城啓一^{A)}, 久米恭^{A)}, 安田啓介^{B)}, 石神龍哉^{A)}, 辻宏和^{A)},
Satoshi Hatori^{#, A)}, Tetsuro Kurita^{A)}, Yutaka Hayashi^{A)}, Hiroaki Yamada^{A)}, Keiichi Takagi^{A)}, Kyo Kume^{A)},
Keisuke Yasuda^{B)}, Ryoya Ishigami^{A)}, Hirokazu Tsuji^{A)},
^{A)} The Wakasa Wan Energy Research Center

^{B)} The Wakasa Wan Energy Research Center (Present Affiliation: Kyoto Prefectural University)

Abstract

One of the researches of The Wakasa Wan Energy Research Center is the utilization of the ion beam for science and industry. For the purpose, we constructed the accelerator facility with a 5 MV tandem accelerator, 200 MeV proton synchrotron and the beam lines dedicated to each accelerator.

Recent development of the tandem accelerator and its beam lines has been for the ion beam analyses. The analysis of the light element such as hydrogen and lithium has been improved. Microbeam is utilized for the element analysis.

A proton beam with an energy of 200 MeV from the synchrotron has a range of almost thickness of the human body, therefore, the clinical study of the cancer therapy had been performed by 2009. The irradiation of the biological target has been researched. The energy of 200 MeV is also near the mode of the energy distribution of the solar cosmic ray. The beam has been used for the radiation-resistant performance of the equipment in the spacecraft.

1. はじめに

福井県は 2011 年 3 月 11 日以前は関西の電力の半分強をまかなうエネルギー供給県であり、その 9 割は若狭湾地方に集中する商業原子炉による原子力発電である。このような特色を活用し、エネルギー関連技術や地域産業への応用技術の研究、研修などを目的として、1994 年財団法人（現在は公益財団法人）若狭湾エネルギー研究センター（WERC）が設立された。1998 年には研究施設である福井県若狭湾エネルギー研究センターが開所し、その運営・管理を行っている。

WERC の研究開発の一つに加速器からえられる荷電粒子線（イオンビーム）の利用研究がある。その目的のために施設開所と同時に加速器システムの建設を開始した。システムは高周波整流型 5 MV タンデム加速器、タンデム加速器を入射器とする 200 MeV 陽子シンクロトロンを二つの加速器を中心として構成される。

近年、タンデム加速器ビーム利用に関しては、イオンビーム分析技術の開発が精力的に行われている。弾性反跳検出分析法（Elastic Recoil Detection Analysis, ERDA）と飛行時間測定法（Time of Flight measurement, TOF）を組み合わせると、水素やリチウムなどの軽元素分析技術の向上や、マイクロビームを用いた元素分析利用が著しい。

シンクロトロンからの 200 MeV 陽子ビームは、水等価で 25 cm 程度の飛程、すなわち人体の厚み程度の飛程をもつ。このことから、2009 年までがん治療の臨床研究が行われてきた。生物照射研究も盛んに

行われている。

また、50~200 MeV の範囲で陽子エネルギーは可変であり、地球磁場に捕捉される荷電粒子から太陽宇宙線のピークエネルギー近くまでカバーする。このことから、近年、宇宙機に搭載される機器の耐放射線性能や動作状況の評価にも用いられている。

本論文では WERC の加速器システムの構成、開発、その応用について紹介する。

2. WERC 加速器施設

Figure 1 に WERC 加速器施設の加速器やビームラインの概略を示す。

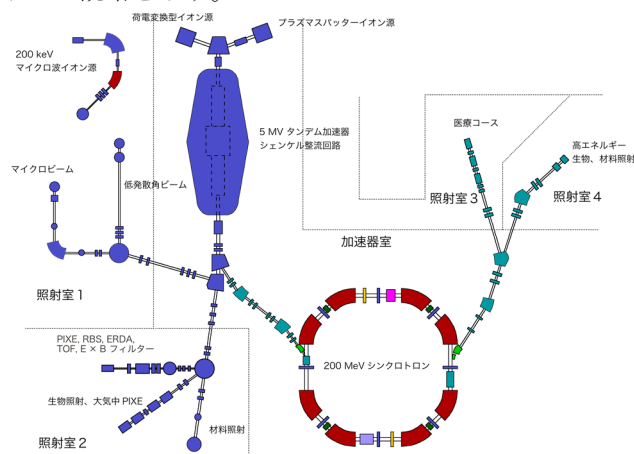


Figure 1: Schematic layout of the accelerator system at WERC.

2 種類の負イオン源により生成された負イオンは 5 MV タンデム加速器により加速され 2 つの照射室に導かれイオンビーム分析やイオン注入実験が行わ

[#] hatori@werc.or.jp

れる。タンデム加速器は 200 MeV 陽子シンクロトロンの入射器としても用いられる。シンクロトロンにより加速されたビームは、別の 2 つの照射室に導かれ、医療照射研究や生物照射、材料、電子機器などへの照射が行われる。

3. タンデム加速器

3.1 プラズマスパッターイオン源

水素負イオンもしくは固体元素の負イオン発生には熱陰極型プラズマ発生装置とコンバージョンターゲットを組み合わせたイオン源が用いられる^[1]。プラズマ発生用陰極には LaB₆ フィラメントが用いられる。アーク放電により発生したプラズマがコンバージョンターゲットを衝撃することで、プラズマイオン自身（水素の場合）もしくは反跳ターゲットイオンがターゲット表面上で負イオンに変換される。ターゲット表面は仕事関数を下げるために導入されたセシウム蒸気によりコーティングされる^[1]。

アーク放電は DC、パルス両モードで運転可能であり、シンクロトロン利用時は典型的な場合、周波数 25 Hz、パルスデュレーション 250 μs で引き出し、さらに、静電キッカーで 2 Hz、25 μs に分周する。

3.2 荷電変換型イオン源

気体元素の負イオン、とくに大電流のヘリウム負イオンを得るのに用いられる。

熱陰極型正イオン源からえられる正イオンをリチウム蒸気により荷電変換を行い負イオンを得る。ヘリウム負イオンの引き出し電流は 36 μA に達する^[2]。

3.3 タンデム加速器

イオン源から引き出された負イオンは加速電圧 5 MV のタンデム加速器により加速される。加速高電圧は、高周波電圧を倍電圧整流回路カスケードによりえられる。いわゆる、Schenckel 回路であり、ダイナミトロンにより実現されたものと同じ昇圧回路である。

高周波発生回路は絶縁共振トランスの方法を採用している。しかし、二次側コイルと RF 電極—圧力タンク間静電容量で決まる周波数をピックアップする自励方式ではなく、発振管のグリッドを強制的にスイッチングしている。しかし、スイッチング周波数はトランスの 1 次側の電流が最低になるようにフェーズロックをしている。

電圧安定化は回転発電電圧計 (Generating Voltage Meter, GVM) による加速電圧の絶対値測定をもとにしている。バックアップ制御として、絶縁コラムを電位分割固定するためのデバイダー抵抗を流れる電流で制御する方法も用意されている。

さらに、マイクロビームを用いる実験でよく用いられるが、NEC 社製ビームプロファイルモニターの信号を用いて、ビーム位置をロックするように電圧を制御する方法も開発している^[3]。

Figure 2 はタンデム加速器の全景、そして Table 1 に主な性能をまとめる^[2]。



Figure 2: Tandem accelerator.

Table 1: Specification of the Tandem Accelerator

Generation of HV	Schenckel rectifier
Max terminal voltage	5 MV
Max conveyer current	1 mA
Voltage ripple	2 kV@ 5 MV
Insulation gas	SF ₆ 6kgf/cm ² gauge
Accelerator tube	glass-metal organic bonding
Charge exchange	Ar-gas stripper Recirculation and concentration by 4 TMP (50 L/s/pump)

4. タンデムビームライン

4.1 照射室 1

4 連四重極レンズと 2 台の精密スリットを用いて低発散角ビームを生成し、チャネリング手法を用いて結晶構造の解析を行うビームライン『物性分析コース』^[2]と、増倍率(x|x)=1/3.6、(y|y)=1/14 の 2 連四重極レンズを用いたマイクロビームライン『元素分析コース』がある。マイクロビームラインでは粒子線誘起 X 線検出 (Particle Induced X ray Emission, PIXE) や γ 線検出 (Particle Induced Gamma ray Emission, PIGE) により、試料の元素分布マッピング測定が行われる^[2]。ビームを大気を導入するセットアップも可能であり歯科試料や植物試料などの測定も行われている^[4]。

4.2 照射室 2

ビーム照射中の試料温度を低温 (100~300 K)、高温 (1000 K) に制御できる『イオン注入コース』^[2]、アパーチャーによりマイクロビームに成形する『生物照射コース』^[2]、5 軸ターゲットゴニオメーター、検出器用ターンテーブル、TOF ポートを備え

た散乱槽、ウィーンフィルター+TOF 質量分析ラインからなる『イオン分析コース』^[2]が設置されている。

イオン注入コースでは半導体の照射損傷試験やイオン注入実験が行われている。宇宙用途や原子炉、加速器施設で用いられる半導体デバイスの放射線耐性が調べられている^[5]。

生物照射コースは二組のアーチャーとキャピラリーにより最小径10 μs のビームを得ることができ、単一細胞照射システムが構築されている^[2]。

イオン分析コースを用いて軽元素分析技術の開発が行われている。TOF と ERDA 法を組み合わせた分析手法では、試料中深さ方向の位置分解能は1.3 nmに達する。Figure 3 にセットアップを示す。反跳されるターゲット粒子は2台の透過型検出器(T1, T2)を用いてその飛行時間を測定し、シリコン表面障壁半導体検出器(SSB)により反跳エネルギーを測定する。透過型検出器は炭素薄膜、静電ミラー、マイクロチャンネルプレート(MCP)からなり、炭素薄膜透過時の2次電子をMCPで検出する^[6]。

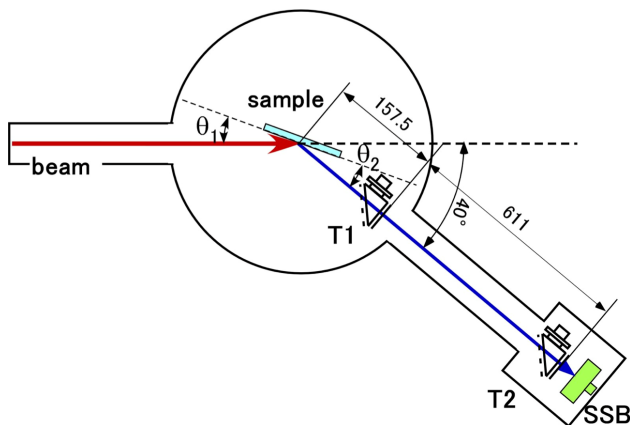


Figure 3: TOF-ERDA experimental set up.

4. シンクロトロン

Figure 4 にシンクロトロン全景、Figure 5 にシンクロトロン構成要素の概略図を示す。



Figure 4: Panoramic view of the synchrotron. Tandem beam is injected along the beam line at the lower right.

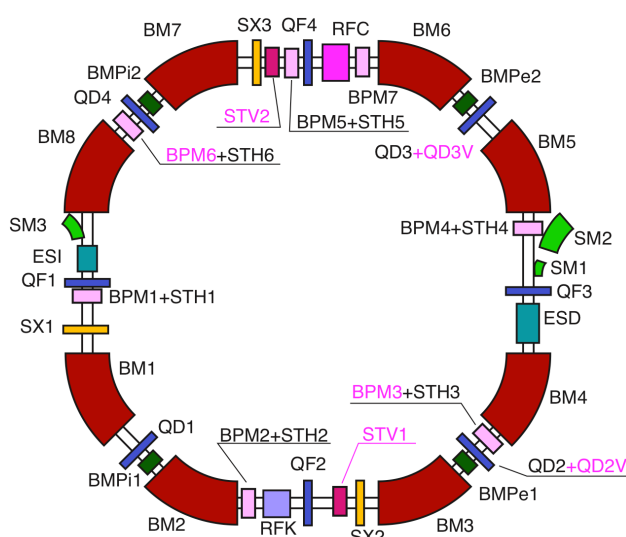


Figure 5: Schematic layout of the synchrotron.

Table 2: Specification of Synchrotron

Incident energy	
H ⁺	10 MeV (B ρ =0.46 Tm)
Heavy ion	2.08 MeV/u (B ρ =0.42 Tm)
Acceleration energy	
H ⁺	200 MeV (B ρ =2.15 Tm)
Heavy ion	55 MeV/u (B ρ =2.15 Tm)
Perion	0.5 Hz
Lattice	QF-B-QD-B
Injection	Multi-turn injection
RF cavity	Asynchronous RF cavity
Extraction	Resonance-RF knockout
Superperiodicity	4
Circumference	33.2 m
Tune	
v _x	1.75
v _y	0.85
Bending magnet	
Bending angle	45 deg
Maximum field	1.12 T
Radius	1.91 m
Momentum compaction	0.31
Natural chromaticity	
x	-0.34
y	-0.36

また、シンクロトロンの諸元を Table 2 にまとめる。^[2]

Figure 5 において、タンデムビームはセプタム電磁石 SM3 と静電セプタム ESI により入射される。多重入射の x 方向に関しては方法がとられる。lattice

は QF-B-QD-B で構成され、偏向電磁石の偏向角が 45 度と大きいので、x 方向収束が無視できず、チューンも x 方向と y 方向で大きく異なる。

建設当初は加速 RF はパターン運転する磁場の変化をサーチコイルで検出し周波数を決定するフィードフォワードのみであったが、現在は、ビームポジションモニターによりビーム位置 ΔR 検出、加速位相 $\Delta \phi$ 検出を行い、RF にフィードバックしている^[7]。

5. シンクロトンビームライン

5.1 照射室 3

水平・垂直 2 門のビームラインと患者位置決め用 X 線 CT をもち、2002 年から 2009 年までがん治療臨床研究が行われ、前立腺 55 例、肝臓 6 例、肺 1 例の治療を行った。現在は動物照射による医療照射基礎研究が行われている^[8]。

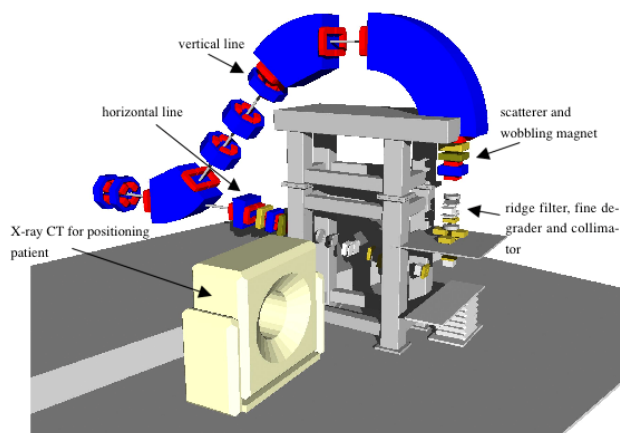


Figure 6: Overview of the therapy beamlines.

5.2 照射室 4

生物試料や工業材料などに照射を行うことができる『生物照射コース』が設置されている。^[2]

生物試料に対する照射は、イオンビームによる突然変異機構に関する放射線生物学の基礎研究^[8]とイオンビームにより引き起こされる突然変異を利用して新しい品種の育種が行われている。登録された品種は 5 種、登録申請中の品種が 3 種ある。維管束植物への照射が多いが、微生物への照射も行われている。

200 ~ 50 MeV の陽子線が利用可能であるが、太陽宇宙線のピークエネルギーから地球磁場に捕捉される荷電粒子のエネルギー範囲と重なる。このことを利用し、近年では、宇宙機に搭載される電子機器や測定器の耐放射線性能の評価に用いられている。

6. まとめ

若狭湾エネルギー研究センターでは放射線利用研究の一環として加速器ビームを用いた応用研究を行っている。応用範囲は、生物学、医学、材料工学、

さらには、近年では、宇宙工学への応用も行われるようになってきている。

ビームの利用手法も、試料への照射による性質の改変、性能評価から、イオンビームによる試料の分析と多岐に亘る。

参考文献

- [1] Mori, Y., Takagi, A., Ikegami, K. and Fukumoto, S., "THE CUSP H- ION SOURCE AT KEK" in AIP Conference Proceedings 158, New York: American Institute of Physics, 1987, p. 378.
Mori, Y., Alton, G.D., Takagi, A., Ueno, A. and Fukumoto, S., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A273 (1988) 5.
- [2] S. Hatori *et al.*, "Developments and applications of accelerator system at The Wakasa Wan Energy Research Center" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B241 (2005) 862.
- [3] M. Hiroto *et al.*, "Control of the acceleration voltage by using a beam profile monitor", Proceedings of the 21st Meeting for Tandem Accelerators and their Associated Technologies, 2008, p. 59.
- [4] K. Yasuda *et al.*, "Progress of in-air microbeam system at the Wakasa Wan Energy Research Center", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B269(2011)2180.
- [5] K. Koike *et al.*, "8MeV proton irradiation damage and its recovery by annealing on single-crystalline zinc oxide crystals", 2012 MRS Symposium Proceedings, Vol. 1432, g10-02 (12pp), 2012.
- [6] K. Yasuda *et al.*, "Development of a TOF-ERDA measurement system for thin film analysis", Proceedings of the 22nd International Conference on Ion Beam Analysis, 2015, *in press*.
Keisuke Yasuda *et al.*, "Depth resolution of TOF-ERDA using a He beam", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B269(2011) 1019.
- [7] T. Kurita *et al.*, "THE STATUS OF THE SYNCHROTRON OF THE WAKASA WAN ENERGY RESEARCH CENTER", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2013, p. 367.
- [8] K. Takagi *et al.*, "Immunofluorescence of γ -H2AX in a root tip of *Arabidopsis thaliana* after the irradiation of X-ray.", RIKEN Accelerator Progress Report 44(2011)266.