

30MeV サイクロトロンを用いた小型中性子源の概念設計

CONCEPTUAL DESIGN OF A COMPACT NEUTRON SOURCE USING A 30 MEV CYCLOTRON

栗山靖敏^{#, A)}, 日野正裕^{A)}, 田中浩基^{A)}, 石禎浩^{A)}, 上杉智教^{A)}, 岩下芳久^{A, B)}
Yasutoshi Kuriyama^{#, A)}, Masahiro Hino^{A)}, Hiroki Tanaka^{A)}, Yoshihiro Ishi^{A)},
Tomonori Uesugi^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{B)}

^{A)}Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University

^{B)}Institute for Chemical Research, Kyoto University

Abstract

While the joint use of neutrons extracted from a research reactor (KUR) is being actively conducted in Kyoto University Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science (KURNS), it is expected to be difficult to continue the operation after 2026 under current condition. Since an alternative neutron source is required, the 30 MeV proton cyclotron (HM-30) installed for the BNCT research in KURNS is now being discussed as a proton driver for the neutron source. In this presentation, we report on the design status of a neutron source using HM-30.

1. 背景

京都大学複合原子力科学研究所（以下、複合研とする）では、中型の中性子源として、最大熱出力 5MW の研究用原子炉（以下、KUR とする）から取り出された中性子を用いた共同利用が盛んに行われている。しかしながら、使用済み燃料の返還期限の問題から、KUR は 2026 年以降の運転継続は困難と見込まれる状況[1]となっているため、KUR を代替する中性子源の建設が急務となっている。

複合研には、ホウ素中性子捕捉療法（以下、BNCT とする）研究のために住友重機械工業株式会社（以下、SHI とする）製の平均ビーム電流 1mA、取り出しビームエネルギー 30MeV の陽子サイクロトロン（以下、HM-30 とする）がイノベーションリサーチラボラトリー（以下、イノベラボとする）に設置[2, 3]されており、当初は共同研究を行っていた企業の所有であったが、2019 年に京都大学に譲渡された。そのため、HM-30 を KUR 代替中性子源のための陽子加速器としての活用が議論されている。



Figure 1: Appearance of KUR, KUCA and Innovation Research Laboratory in KURNS.

Figure 1 に、KUR、臨界集合体実験装置（KUCA）ならびにイノベラボの写真[4]を示す。

2. イノベラボにおける加速器の配置

イノベラボには、5 台のリング型加速器、1 台の線形加速器が設置されている。これらの加速器のうち、現在稼働しているものとしては、150MeV FFAG 加速器（以下、150MeV FFAG とする）とその入射器である 11MeV 線形加速器（以下、線形加速器とする）[5]ならびに HM-30[6]である。

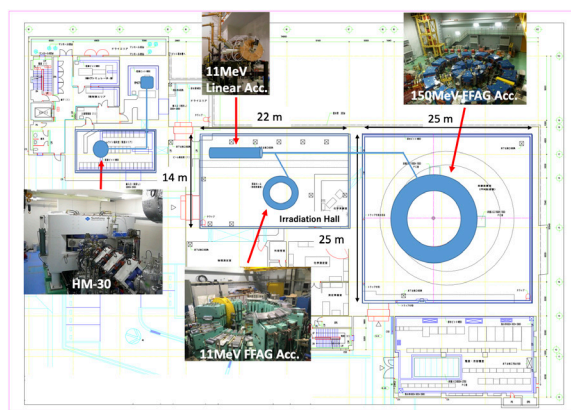


Figure 2: Layout of accelerators at Innovation Research Laboratory.

イノベラボは医療棟と実験棟に分かれており、HM-30 は医療棟 1 階に、150MeV FFAG と線形加速器は実験棟 1 階に設置されている。Figure 2 にイノベラボにおける加速器の配置を示す。

[#]kuriyama.yasutoshi.6n@rri.kyoto-u.ac.jp

HM-30を用いた加速器中性子源計画では、イノベラボ実験棟照射ホールにある既設の線形加速器ならびに 11MeV FFAG 加速器[7] (現在休止中)を他施設またはイノベラボ実験棟にある 150MeV FFAG 設置の部屋まで移設することで、照射ホールに中性子発生のためのターゲットステーションを設置する場所を確保することを検討している。

3. 複合研における BNCT 研究ならびに 30MeV 陽子サイクロトロン(HM-30)

3.1 複合研における BNCT 研究

京都大学では、2007 年から HM-30 を用いた BNCT システムの開発を SHI と進め、2008 年末に複合研イノベラボ医療棟に同システムを設置した。本システムは、HM-30 と Be 標的より発生する中性子を BNCT に適したエネルギーにまで減速し、照射するターゲットステーションから構成されている[8]。Figure 3 に複合研における BNCT システムの配置図を示す[3]。

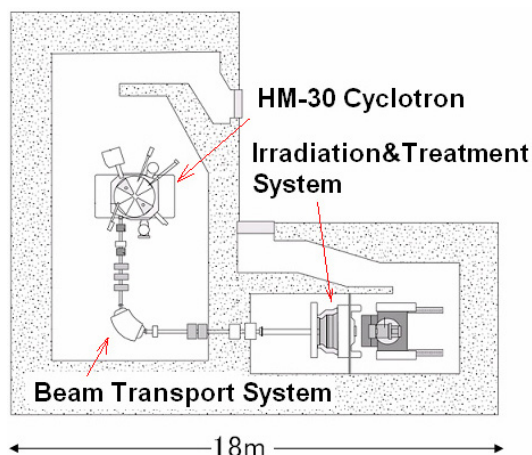


Figure 3: BNCT layout at KURNS.

Table 1: Specifications of HM-30

Particle	H
Injection Energy	30 keV
Extraction Energy	30 MeV
RF Frequency	73.1 MHz (h=4)
RF Voltage	200 kV/turn
Extraction Scheme	Foil
Ext. Beam Current	1 mA DC
Size	W×D×H : 3×1.6×1.7 m

BNCT では、ホウ素が中性子を捕獲することでアルファ粒子を放出し、ホウ素より放出されたアルファ粒子ががん細胞を破壊することで治療を行う。Figure 4 に BNCT における癌治療の概念図を、Fig.

5 に本システムで発生する中性子のエネルギー分布を示す[3, 9]。

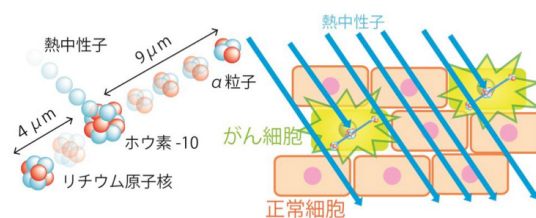


Figure 4: BNCT concept. Boron capture neutron and emit alpha particle. A cancer cell is damaged by this alpha particle.

複合研における研究の成果として、切除不能な局所進行又は局所再発の頭頸部がんを対象として、2020年3月11日にSHIが医療機器、2020年3月25日にステラファーマ株式会社が医薬品の製造販売承認を取得している[9]。

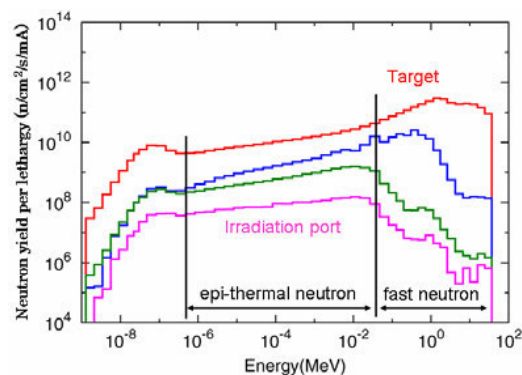


Figure 5: Neutron energy distribution of BNCT system using HM-30.

3.2 HM-30

BNCT 研究のために設置された HM-30 は SHI 製の 30MeV 陽子サイクロトロンである。Figure 6 にイノベラボ医療棟に設置された HM-30 の外観を、Table 1 に HM-30 の主な仕様を示す[3]。



Figure 6: Appearance of HM-30 at Innovation Research Laboratory.

BNCT 研究のために、30kW の陽子ビームが HM-30 より取り出され、Fig. 3 に示すように、90 度偏向されたビームトランスポートを經由して、ターゲットステーションに陽子ビームが輸送されている。

4. 加速器中性子源のための 30MeV 陽子ビームトランスポート

4.1 トランスポート概要

Figure 2 に示す通り、HM-30 は、イノベラボ医療棟に設置されている。加速器中性子源のためのターゲットステーションについては、イノベラボ実験棟にある照射ホールに設置することを検討している。

HM-30 中心から照射ホールまでは約 13m であり、HM-30 取り出し地点を起点とすると、中性子発生標的まではターゲットステーションの設計に依存するが、大凡 15~20m になる。Figure 7 に検討中の新しいビームトランスポート（以下、BT2 とする）について、青色図形で示す。

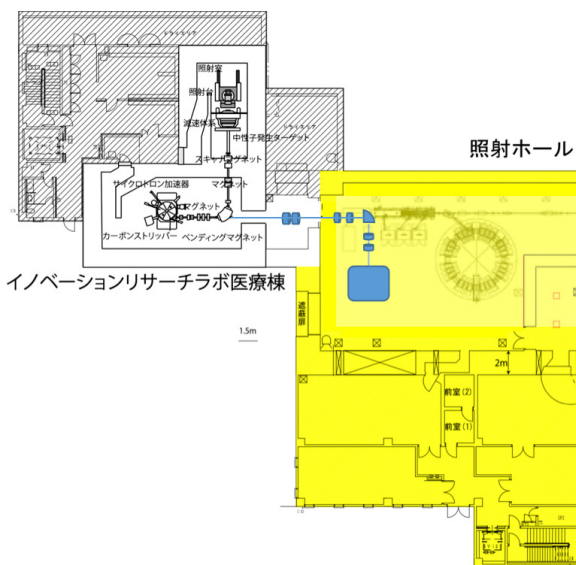


Figure 7: New beam transport for accelerator driven neutron source. Blue objects indicate component of new beam transport.

BT2 の建設のためには、照射ホール設置の線形加速ならびに現在運転休止状態となっている 11MeV FFAG 加速の移設が必要であるが、これらの加速器の移設は、それぞれ 2021 年度と 2022 年度を予定している。

4.2 G4beamline を用いた計算体系の構築

BT2 設計におけるビーム輸送計算を実施するために、G4beamline（以下、g4bl とする）[10]を用いた計算体系の構築を行なった。BT2 の建設では、既存の 4 極電磁石の再利用が念頭に置かれているため、150MeV FFAG 加速器の入射ならびに取り出しビームラインで使用されている 4 極電磁石をモデル化し

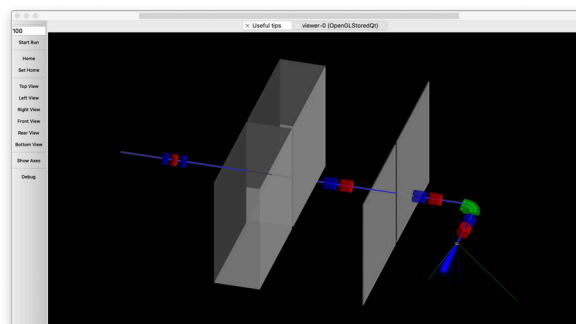


Figure 8: Computation scheme of new beam transport for accelerator drive neutron source using G4beamline. Green object indicates bending magnet and blue and red objects indicate focus and defocus quad magnet, respectively. Be target is located at the endpoint.

た電磁石でのビームラインの設計を進めている。Figure 8 に g4bl で構築した計算体系を示す 3 次元図を示す。

また、暫定的に、HM-30 取り出しビームについて、ガウス分布を仮定しビームパラメータとして Eq. (1-3)を仮定したビーム輸送計算を行なった。

$$\sigma_x = \sigma_y = 3 \text{ mm} \quad (1)$$

$$\sigma_{x'} = \sigma_{y'} = 1 \text{ mrad} \quad (2)$$

$$\Delta P = 1 \% \quad (3)$$

Figure 9 に、g4bl で計算されたビームの初期サイズと HM-30 取り出し位置から約 19m の位置に設置された中性子発生標的におけるビームサイズを示す。

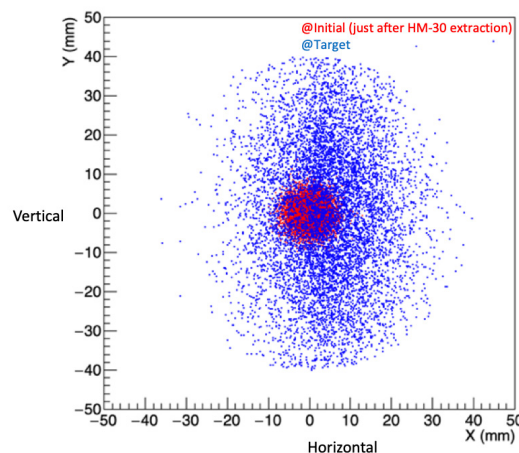


Figure 9: The comparison at initial condition (red dots) and after transport (blue dots) based on beam size using G4beamline.

また、Fig. 10 にビーム輸送中のビームサイズについて、HM-30 取り出し位置を起点としたグラフを示す。

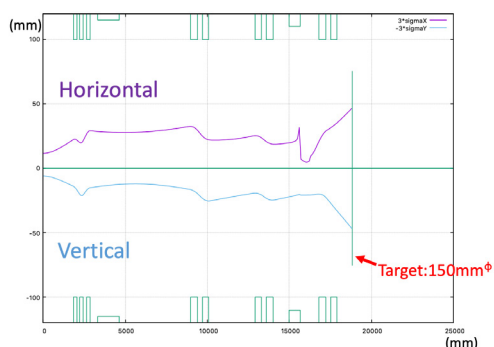


Figure 10: Beam tracking result of the second beam transport (BT2) for accelerator drive neutron source using G4beamline.

5. PHITS による中性子発生量の見積もり

5.1 中性子発生標的

BNCT 研究での知見から、中性子発生標的としては、5.5mm 厚の Be 標的の採用を予定している。5.5mm 厚を採用することで、陽子の飛程がターゲットの厚みよりも長くなり、入射陽子はターゲット内に留まることなく冷却水中に入射される。これによってブリストリング現象の発生を抑えることができる [12]。

5.2 中性子発生量の見積もり

PHITS(ver.3.04)[11]を使用して、直径 120mm の一様な円状の 30MeV 陽子ビームが 5.5mm 厚の Be 標的に入射した場合の発生中性子量を見積もった。PHITS による計算結果を Fig. 11 に示す。

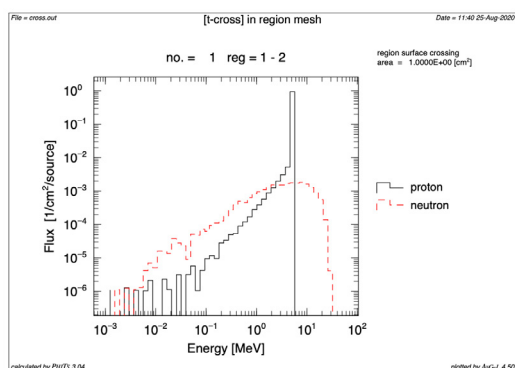


Figure 11: Neutron and proton energy distribution from Be target.

PHITS による計算結果より、平均ビーム電流 1mA を仮定した場合、発生する中性子は 1.6E-2 neutrons/proton、発生中性子総量は 1E14 neutrons/s と予想される。

6. まとめと今後の計画

複合研では、研究用原子炉(KUR)を使用した共同利用が盛んに実施されているが、使用済み燃料の返

還期限の問題から、2026 年以降の KUR の運転継続は困難と見込まれる状況となっている。そのため、KUR 代替の中性子源の建設が急務となっており、BNCT 研究のために複合研に設置されている 30MeV 陽子サイクロトロン(HM-30)を利用した中性子源建設の検討が始まっている。HM-30 から中性子発生ターゲットステーションまでのビームトランスポートの概念設計を行うために、G4beamline を用いた計算体系の構築を行った。また、中性子発生量の見積もりには、PHITS を用いた計算を実施している。現状は暫定的なパラメータでの評価を実施した段階だが、2026 年までの加速器中性子源の共同利用への供与を目標とし、より現実的なビームパラメータでのビーム輸送計算を行い、遮蔽計算や中性子減速シミュレーションを行うことを予定している。

参考文献

- [1] 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力学術委員会 原子力研究開発基盤作業部会(第 2 回) H29.5.29 資料 4;
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/087/shiryo/_icsFiles/afieldfile/2017/06/08/1386563_3.pdf
- [2] H. Tanaka *et al.*, "Characteristics comparison between a cyclotron-based neutron source and KUR-HWNIF for boron neutron capture therapy", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 267, Issue 11, 2009, Pages 1970-1977.
- [3] T. Mitsumoto *et al.*, "BNCT SYSTEM USING 30 MEV H-CYCLOTRON", Proceedings of CYCLOTRONS 2010, Lanzhou, China.
- [4] 川端祐司, "京都大学における研究炉の再稼働と複合原子力科学研究所としての再出発", H29 年度「原子力人材育成ネットワーク」報告会;
<https://jn-hrd-n.jaea.go.jp/material/backno03/20180216-nhrdn-report-conference/houkoku-2-2.pdf>
- [5] Y. Ishi *et al.*, "Recent Experimental Results of the Accelerator Driven System with a Sub-Critical Nuclear Reactor (ADS) Program", Cyclotrons 2019, Cape Town, South Africa.
- [6] HM-30 Cyclotron;
<https://www.shi.co.jp/quantum/eng/product/bnct/hm30.html>
- [7] Y. Mori *et al.*, "Intense Negative Muon Facility with MERIT ring for Nuclear Transmutation", Proc. of 14th Int. Conf. on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance(μ sR2017), Hokkaido, Japan.
- [8] H. Tanaka, "Experimental verification of beam characteristics for cyclotron-based epithermal neutron source (C-BENS)", Applied Radiation and Isotopes 69 (2011) 1642-1645.
- [9] 研究成果報告, "粒子加速器を用いた BNCT (ホウ素中性子捕捉療法) が実現一頭頸部がんを対象とした医療機器・医薬品の製造販売承認を獲得-", Apr. 2020;
http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2019/200325_3.html
- [10] G4beamline;
<http://www.muonsinternal.com/muons3/G4beamline>
- [11] T. Sato *et al.*, "Particle and Heavy Ion Transport Code System, PHITS, version 2.52", Journal of Nuclear Science and Technology, 50:9, 913-923(2013).
- [12] 田中浩基, "サイクロトロン加速器BNCT照射システム(C-BENS)の開発と今後の展望", RADIOISOTOPES, 64, 29-36(2015).