

2021年12月15日

医療用中性子源のための核融合技術を活用した負イオン加速器の開発研究

堀池 寛、竹入康彦、長壁正明、磯部光孝

はじめに

- 高エネルギー水素イオンビームの用途は、核融合用や原子力用や産業利用など多くの用途がある
- その一つに、リチウムターゲット中性子源の駆動用ビームとしての応用がある。高中性子束を利用した高dpa照射や物質の改変、加工には、ビームエネルギーと共に電流値が重要で、既往の物理用加速器は電流値が全然足りず、新規研究開発が必要である。
- リチウムでの中性子生成は閾値反応 $<1.9\text{MeV}$ 、 2.0MeV のビームを照射すると 100keV 強の中性子が生成される。 2.6MeV が適当である。高速のDビームを照射すると高エネルギーの中性子が生成される(IFMIF)。
- 2MeV 台のビームで得られる中性子はエネルギーが低く減速や遮蔽に伴う制動放射を最小限に抑制できる。有害なガンマ線輻射の少ないピュアな熱中性子、熱外中性子が作れる。
- ピュアな熱中性子の重要な用途に医療用/ホウ素中性子捕捉療法がある。

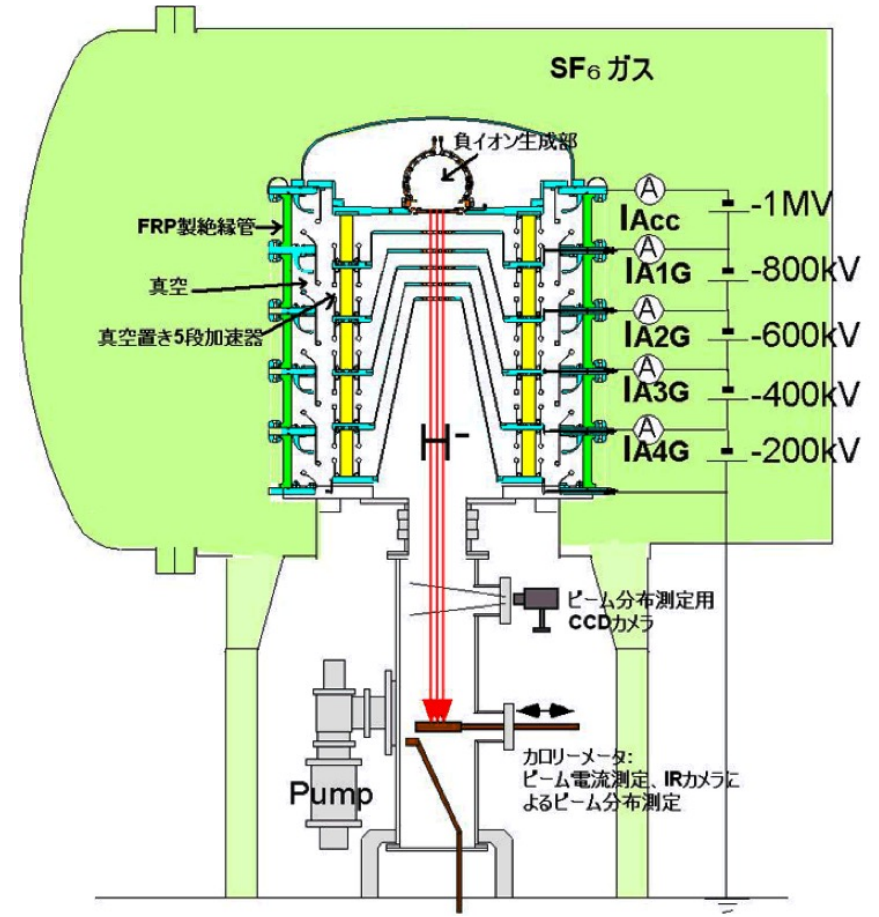
はじめに (続)

- ホウ素中性子捕捉療法(Boron Neutron Capture Therapy)は研究用原子炉で開発されてきた治療法で、BNL、MITR、JRR4、武蔵工大炉、京大炉、ヘルシンキ大、台湾精華大で多くの実績がある。患部の約20cm径の領域に $10^9/\text{cm}^2/\text{sec}$ の熱中性子を50-60分照射する。
- この束を得るには中性子生成量として $10^{13}/\text{sec}$ が必要で、ビーム電流値では15mA程度。
- 2MeV台でこの電流を得るには、負イオンビームのタンデム加速が最も適している。正イオンが良い。
- 那珂研/NIFSでのMeV級負イオン源をタンデム化することにより、2 - 2.5MeVで50mA-100mAのビームを得る。
- 負イオン源を使うことにより、加速電圧と電流値が容易に可変でき、治療の最適化に適する。

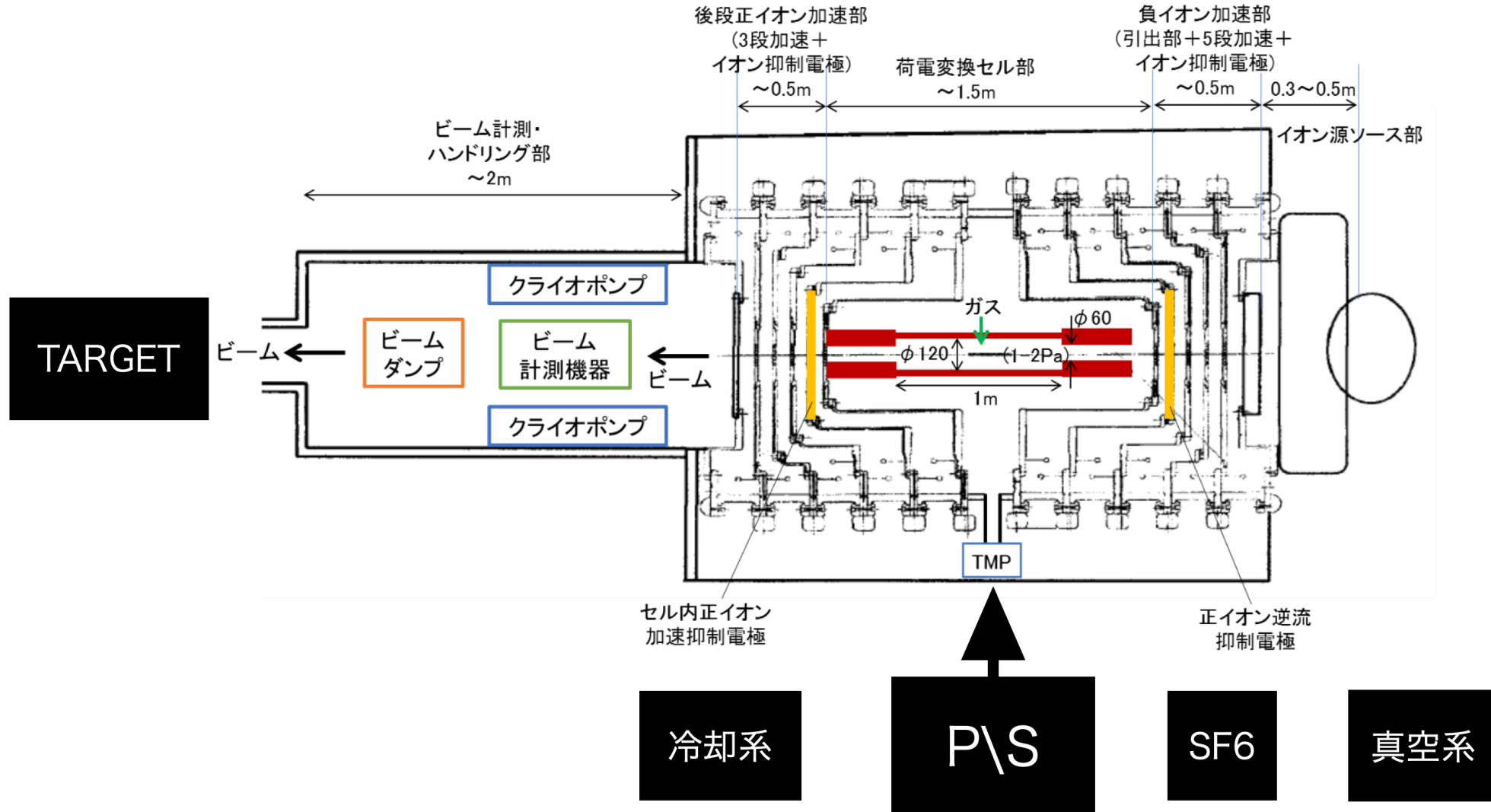
負イオン源開発の現状と展望

- QSTの実績 1000keV 0.75A/19mAcm⁻² 1min
 500keV 13mA/cm² 2min
- NIFSの実績 190keV 40A 2sec
- ITER-NB用に日本と欧州で加速段数の最適化実験を実施し5段加速になったことから、1段積増して6段で1300kVを計画したい。
- タンデム型ではイオン源は地上電位におくことができ、ビーム調整は比較的容易
- 高圧の加速部、電流導入部と荷電変換部 の試作開発が重要
- 正イオンビームの偏向設計など中性子照射対策も検討する

MeV級イオン源 (実験準備棟)



タンデム加速器

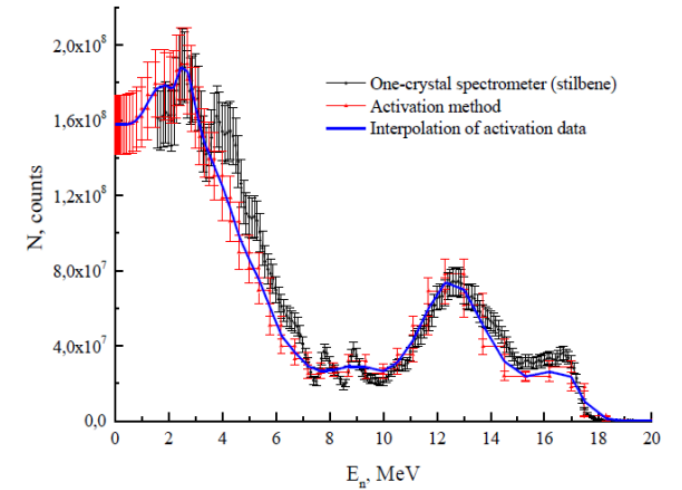
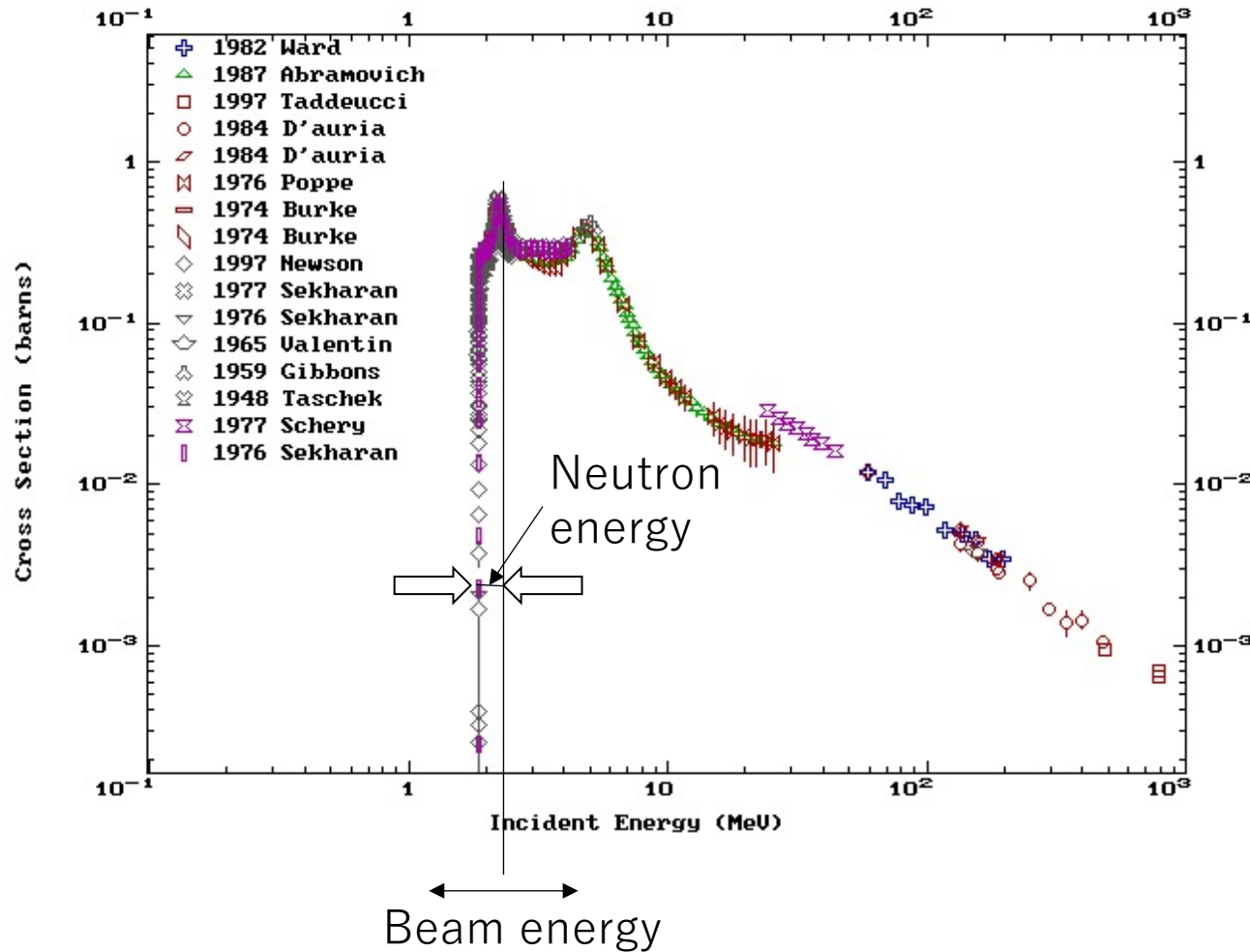


装置仕様

- 加速器 2.6MeV 50 - 100mA H⁻イオン源
- リチウムターゲット: 100 ℓ /minの自由表面流までの段階的開発 (銅板→Li薄膜→液体Li)
- 占有面積 20m x 20m x 5m + 電源、補機
- 電力 加速器200kVA, リチウム系100kVA, 冷却水、補機
- 工程 設計0.5年, 工場製作1年, 試運転試験2年

Neutron energy adjustable in Li system

Cross section ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$



Key of least dose lies in low energy neutron yield.

Neutron energy which is dissipated by radiation, excitation in materials is minimized.

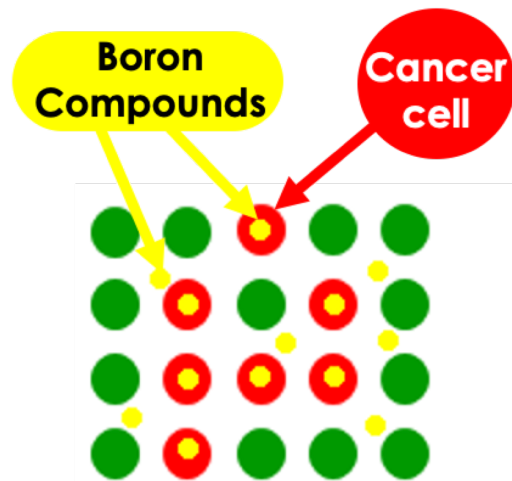
熱中性子源の用途

- 科学研究 電池等, 窒素検知等、医学用/BNCT
- 規模 研究所や大病院に設置可能
- 受電負荷が大きくないこと～300kVA
- 特徴：高熱中性子束, 低被ばく
- BNCTとは
- ^{10}B が熱中性子を吸収して出す α 線とLi線で細胞を殺す
- ホウ素をBPA,BSHという薬剤で投与し、患部へ集積させそこへ中性子照射($10^9\text{n/cm}^2\text{秒}$ で4-60分)
- 低被曝なため再照射が可能で、難治療性再発がんの効果がある
- FBPA-PETでホウ素の集積度を測定するテーラーメイド治療法

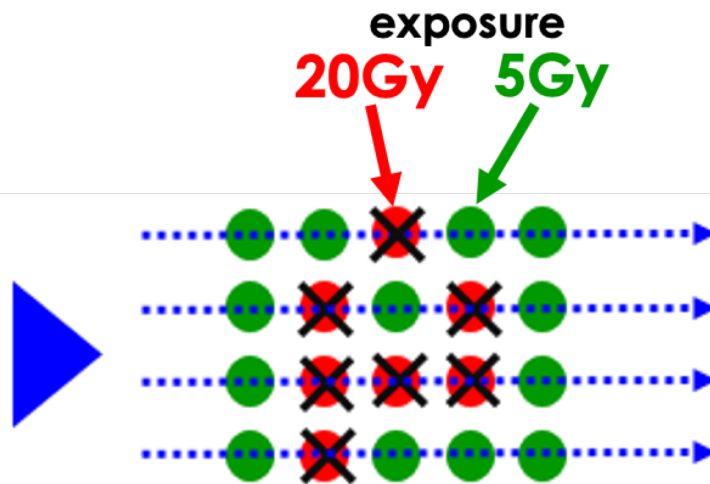
ホウ素中性子捕捉療法 Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)

細胞内で重イオン線が発生する

がん細胞を選択的に殺す

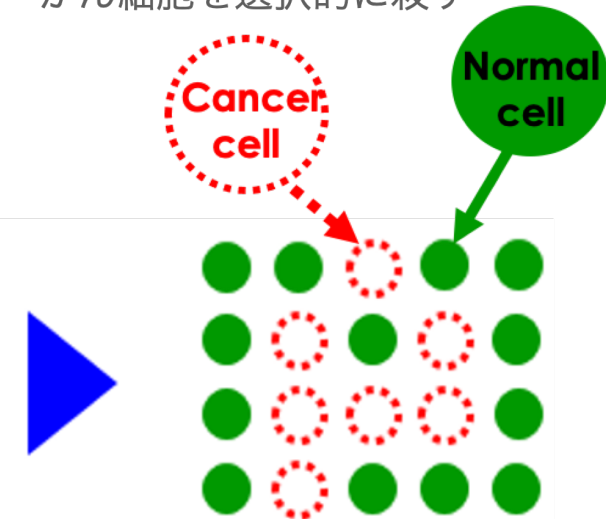


Nutrient with boron is swallowed by active cancer cells.



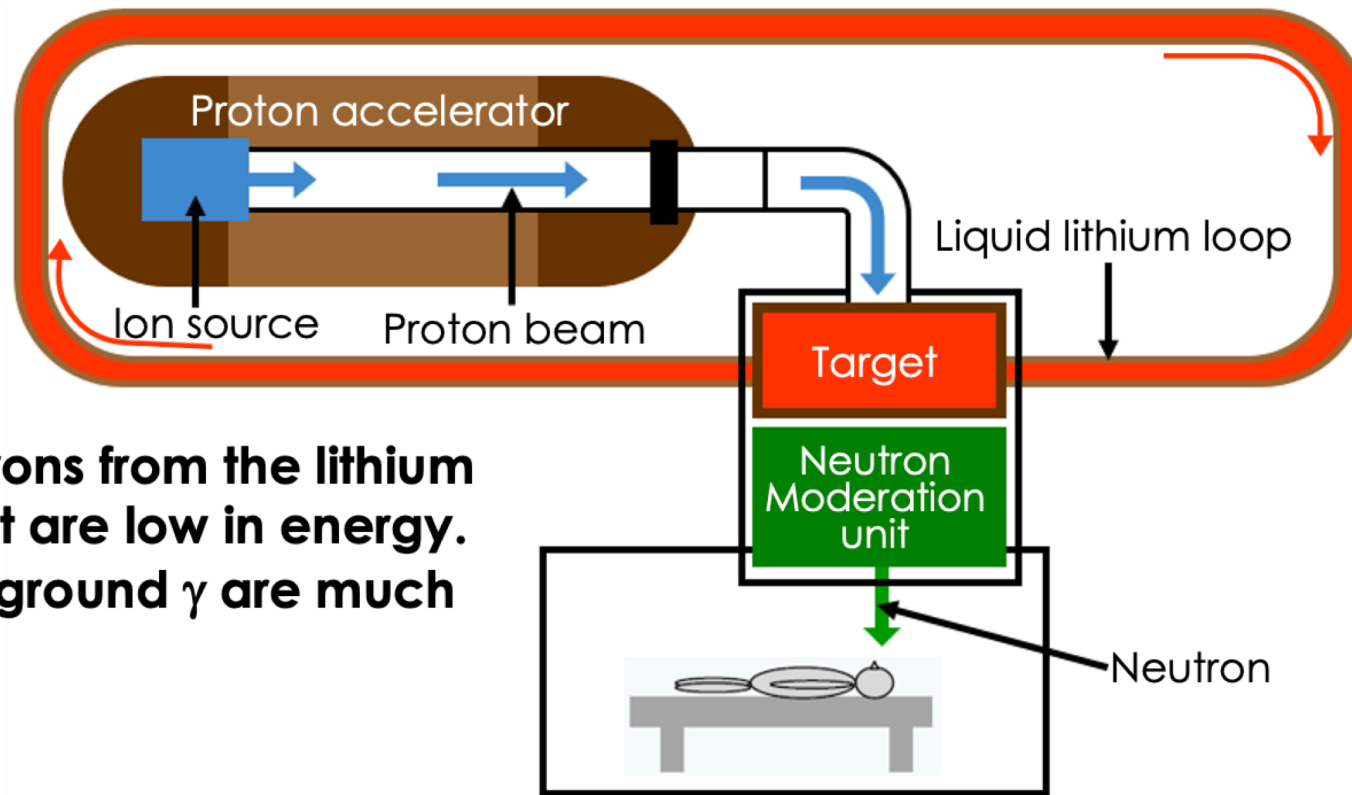
$^{10}\text{B} + n \rightarrow \text{He} + \text{Li} + 2.31\text{MeV} + \gamma \text{ ray}$
 where
 $E_{\alpha}=1.47\text{MeV}$, $E_{\text{Li}}=0.84\text{MeV}$, $E_{\gamma}=478 \text{ keV}$
 Ion's ranges $< 5 - 7\text{mm} <$ cell diameter

マイクロメートル



Energetic ions work as a heavy ion therapy. Cancer cells with many boron are selectively destroyed.

Li based Neutron Source for Medical



Neutrons from the lithium target are low in energy. Background γ are much less.

Liquid lithium target

- **Low exposure**
- **Stable operation**
- **No replacement of target**

Neutron

既往装置との差別化

BNCT用の加速器型中性子源の先行例

- 1) 京大炉で開発された中性子源 サイクロトロン 30MeV 1mA
cw Beターゲット
 - 2) 米NTI社 ダイナミトロン加速器 2.5MeV <15-20mA 回転式
水冷Li薄膜ターゲット
 - 3) がん研究センター 2.5MeV <10-20mA cw RFQ 水冷Li薄膜
- いずれも $<10^9/\text{cm}^2/\text{sec}$ の性能で 治療に1時間かかる。 頻
 繁なTARGET交換要
 - 次世代装置として 高電流、高中性子束を目指す 電流値を増
 かし治療時間短縮 (10-15分)

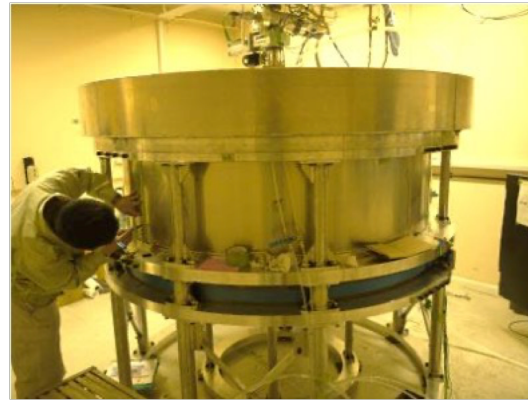
段階的試験研究を積上げてきた

東北大学 $1\mu\text{A}$



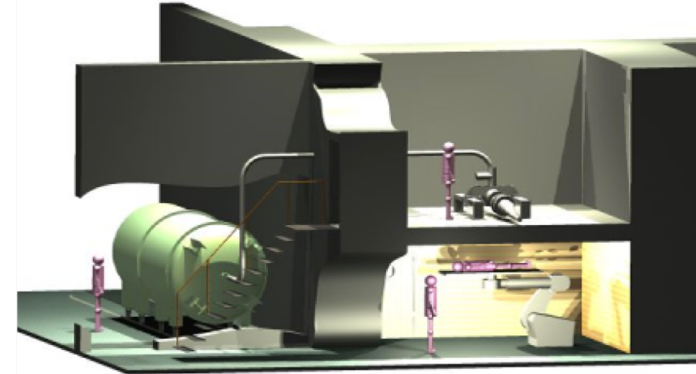
2012

バーミンガム大学 0.5mA



2013

医療用中性子源 50-100mA



2024

Applied Radiation and Isotopes 106 (2015) 92–94

Contents lists available at ScienceDirect

Applied Radiation and Isotopes

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apradiso



ELSEVIER



Liquid Li based neutron source for BNCT and science application



H. Horiike^{a,*}, I. Murata^a, T. Iida^a, S. Yoshihashi^a, E. Hoashi^a, I. Kato^b, N. Hashimoto^c, S. Kuri^d, S. Oshiro^e

^a Graduate School of Engineering, Osaka University, Yamada-oka 2-1, Suita, Osaka 565-0871, Japan

^b Graduate School of Dentistry, Osaka University, Yamada-oka 1-8, Suita, Osaka 565-0871, Japan

^c Graduate School of Medicine, Osaka University, Yamada-oka 2-2, Suita, Osaka 565-0871, Japan

^d New Business Development Department, Mitsubishi Heavy Industries Mechatronics Systems, Ltd., 4-1, Wadamita-dori 5-chome, Hyogo-ku, Kobe 652-0863, Japan

^e Nuclear Business Development, Industrial Minerals Project Dept. No.1, Sumitomo Corporation, 1-8-11 Harumi, Chuo-ku, Tokyo 104-8610, Japan

HIGHLIGHTS

- Liquid lithium (Li) is a candidate material for a target of intense neutron source.
- An accelerator based neutron source with p-liquid Li target for boron neutron capture therapy is under development in Osaka University, Japan.
- In our system, the harmful radiation dose due to rays and fast neutrons will be suppressed very low.
- The system performance are very promising as a state of art cancer treatment system.
- The project is planned as a joint undertaking between industries and Osaka University.

まとめ

- NIFSでは高電圧加速技術を主に開発（銅板ターゲット）
- 中性子試験は医療装置設置サイトとの兼合い

得られるもの

- 核融合の普及効果としての大きな社会貢献
- 原型炉級NBI技術開発の基本技術
- 液体ターゲットから液体ダイバータへの基本技術