



添付資料参照

昭和52年 4月 サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター設置
12月 680AVFサイクロトロン、ビーム引き出しに成功


昭和53年 7月 ISOL・TOF装置完成

昭和54年 7月 第1回サイクロトロン共同利用開始 


昭和56年 3月 PET装置ECAT-II設置


平成11年 4月 1億電子ボルトAVFサイクロトロンに更新、
短寿命核製造専用小型サイクロトロン導入


平成12年 3月 1億電子ボルトAVFサイクロトロンビーム加速に成功

高エネルギー大強度中性子ビーム生成のためのサイクロトロンによる負イオン加速 

加速器中性子によるBNCTの検討 (馬場) 

高速中性子ビームの生成 (岡村) 

電子機器のイオン、中性子照射 (宇宙、ATLAS) (酒見) 

平成23年 3月 東日本大震災 (サイクロトロン、建屋の被害甚大) 

平成24年 7月 サイクロトロン復帰 (ビーム加速)

平成24年10月 第117回共同利用開始予定

今後 ?



最後に：大強度化に向けて (1)

現状

震災からの復帰

テスト加速終了。10月からの共同利用に向けてcomissining 中

K=110 サイクロトロン

軽イオン、重イオン加速は初期の目標を達成

14 GHz 永久磁石ECRECRイオン源（自作）、10 GHz ECRイオン源
（理研より、畑中さん製作）でユーザーの要望は満足？

大強度負イオン加速（加速可能エネルギー 約70 MeV）

300 μ A負イオン源による負イオン加速テスト成功

陽子エネルギー50 MeV位置での引き出し（30 μ A）、引き出し効率100%

大強度化の準備完了（大強度イオン源、入射ラインの増設）



最後に：大強度化に向けて (1)

現状

震災からの復帰

テスト加速終了。10月からの共同利用に向けてcomissining 中

K=110 サイクロトロン

軽イオン、重イオン加速は初期の目標を達成

14 GHz 永久磁石ECRECRイオン源（自作）、10 GHz ECRイオン源
（理研より、畑中さん製作）でユーザーの要望は満足？

大強度負イオン加速（加速可能エネルギー 約70 MeV）

300 μ A負イオン源による負イオン加速テスト成功

陽子エネルギー50 MeV位置での引き出し（30 μ A）、引き出し効率100%

大強度化の準備完了（大強度イオン源、入射ラインの増設）



最後に：大強度化に向けて (2)

実験系現状

高速単色中性子コース（岡村、馬場）（50 MeV単色中性子ビーム）

宇宙環境電子機器の中性子照射テスト

単色中性子ビームによる核反応（偏極ターゲットの検討）

加速器中性子による BNCT Therapy の検討

ビーム強度、減速系

これから？

「負イオン加速による大強度陽子ビームの加速と中性子ビームの発生」

70 MeV, 1-3mA

大強度負イオン源（30 mA), 新規入射ライン, 真空箱改造, シールド

「加速器中性子による BNCT 施設」（医学系の協力？）

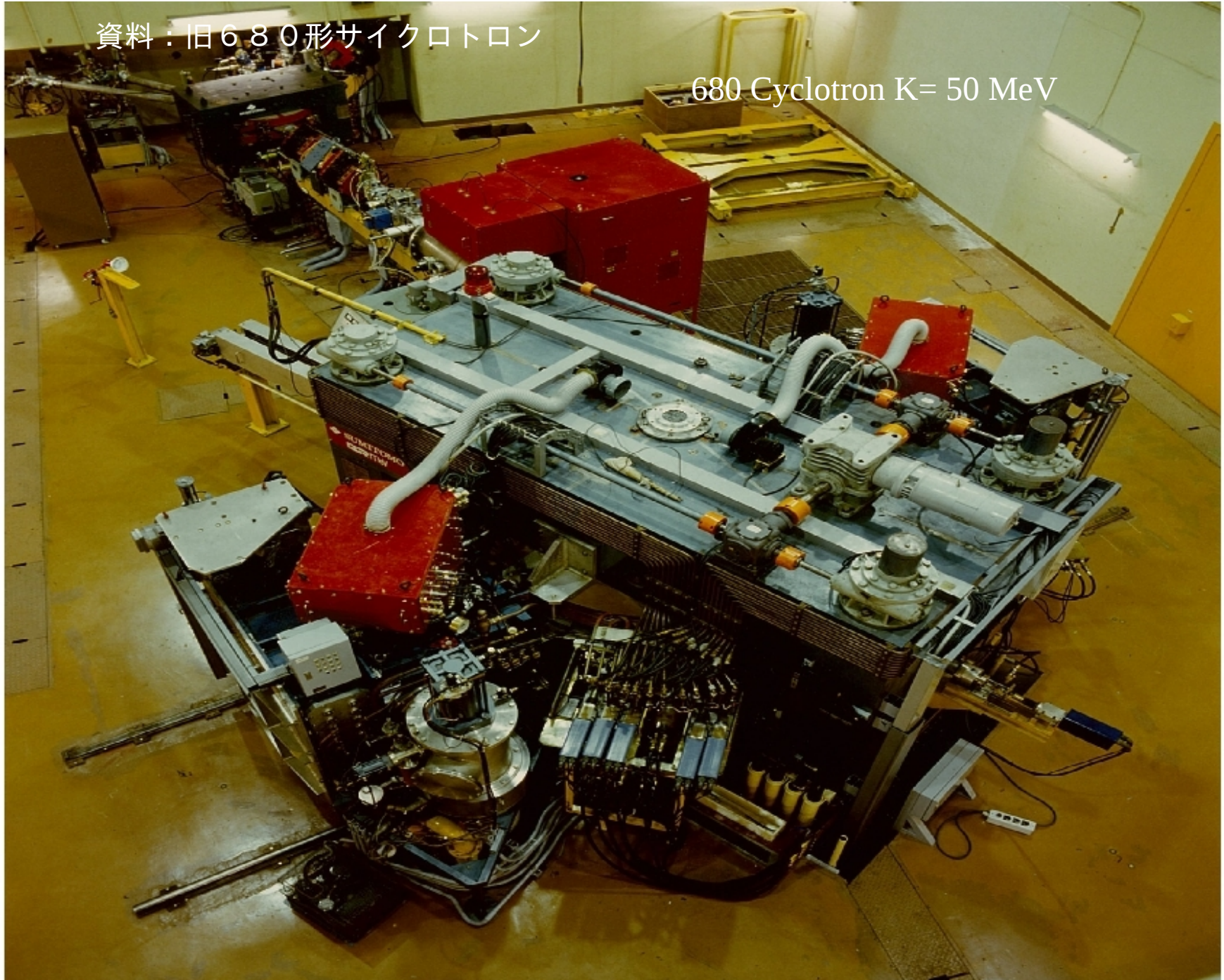
「偏極 ^3He ターゲットと中性子ビーム」（物理系）

「中性子ビームによる宇宙環境電子機器の照射テスト」（工学系）



資料：旧680形サイクロトロン

680 Cyclotron K= 50 MeV

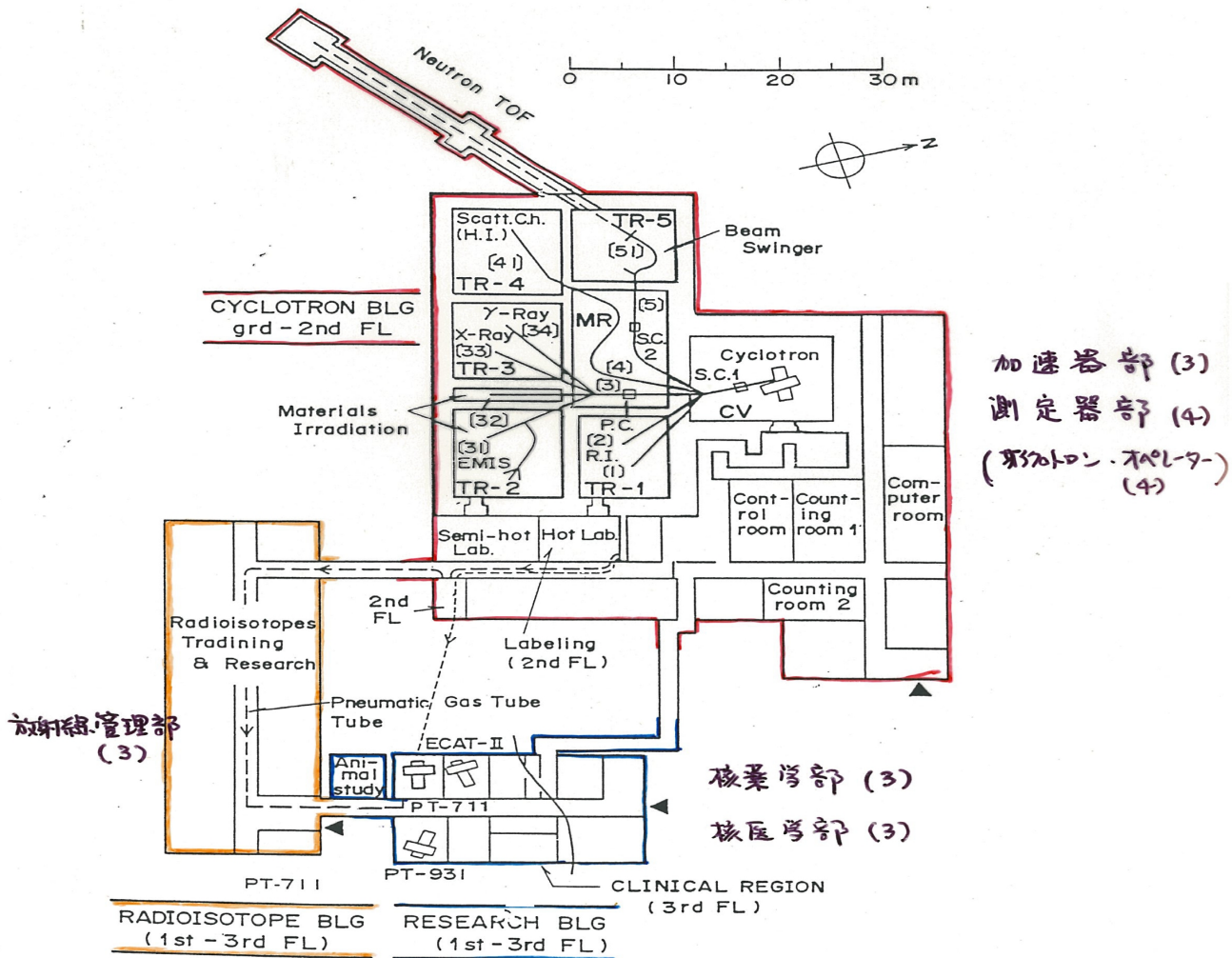




資料：旧680形サイクロトロン

1978: First beam



院内共同利用開始





資料：930形サイクロトロンへの更新

What's new cyclotron?

- K = 130 MeV
- Negative ion acceleration (up to 300 μ A) 
- Heavy ion acceleration
 - 3 ECR ion sources
 - proto type ECR (all permanent magnet) 
 - full-scale ECR (AECR of Berkeley)
 - small and high-efficiency ECR (RI-beam of ^{15}O , ^{11}C and ^{18}F)
combined with the radioactivity produced by small cyclotron
- Time Sharing of beam (Concurrent use at different target rooms)

New equipment ?

- Large CsI detector array (high energy gamma detection)
- Clover type Ge(HP) detectors (Ge ball)
- Large size magnet (spectrometer and filter : old cyclotron)
- New TOF system
- New On-line Isotope Separator (RF IGISOL)



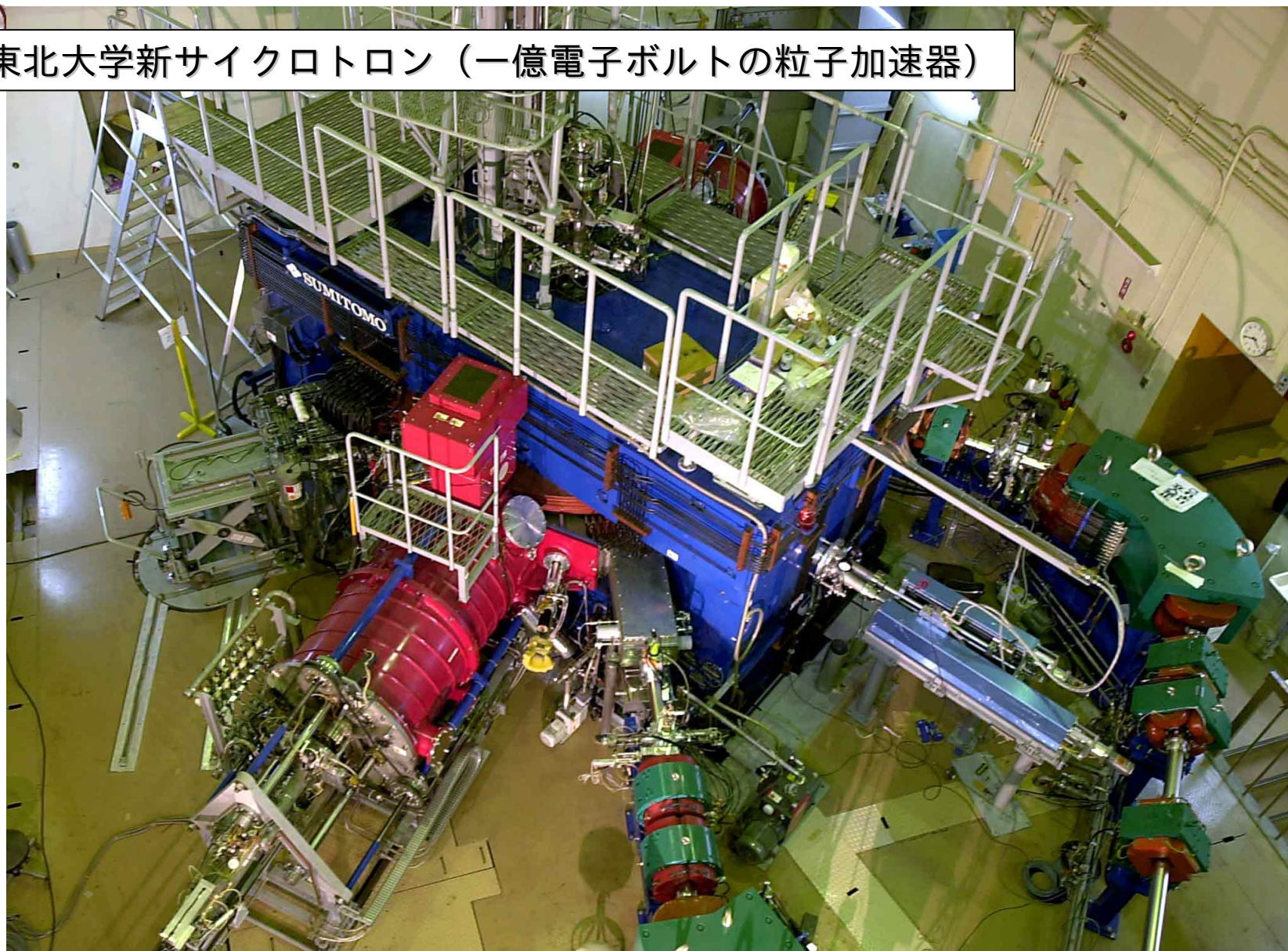
資料：930形サイクロトロンへの更新

更新の状況

- 1998/4/9 旧サイクロトロン運転停止（本体室工事）
1998/9 小型サイクロトロン運転開始（第1ターゲット室） **部分共同利用再開**
1999/1 新サイクロトロン本体室据付開始
1999/10 本体入射系、出射系完成
1999/12 全体調整開始（working 30 hours/day）
2000/3 **first beam** (2000/3/6) 3/10 サイクロトロン完成式典
2000/4 – 2000/12
6/5 陽子50MeV 引き出し成功
6/6 陽子70MeV引き出し成功
6/28,29 第1回加速器施設検査（本体室遮蔽検査）
ビーム加速テスト（粒子種、エネルギー、各コース）
11/30 第2回加速器施設検査（全ターゲット室遮蔽検査）
12/28 施設検査合格証
2001/1 **サイクロトロン共同利用開始**（試験利用、小型、大型同時運転）
-
- 2001/4 サイクロトロン本格共同利用開始
2001/4 重イオン加速テスト
2001/8 負イオン源加速テスト（大強度ビーム化）



東北大学新サイクロトロン（一億電子ボルトの粒子加速器）





資料：930形サイクロトロンへの更新 まとめ

大学内共同利用研として、サイクロトロンが更新されたことにより、21世紀を迎えるにあたり、より有機的な加速器利用による研究が進展できる。

新しいサイクロトロンにより、

エネルギーが倍以上になる

水素からクリプトンまでの重イオンが加速出来る

大電流の陽子、重陽子が得られる

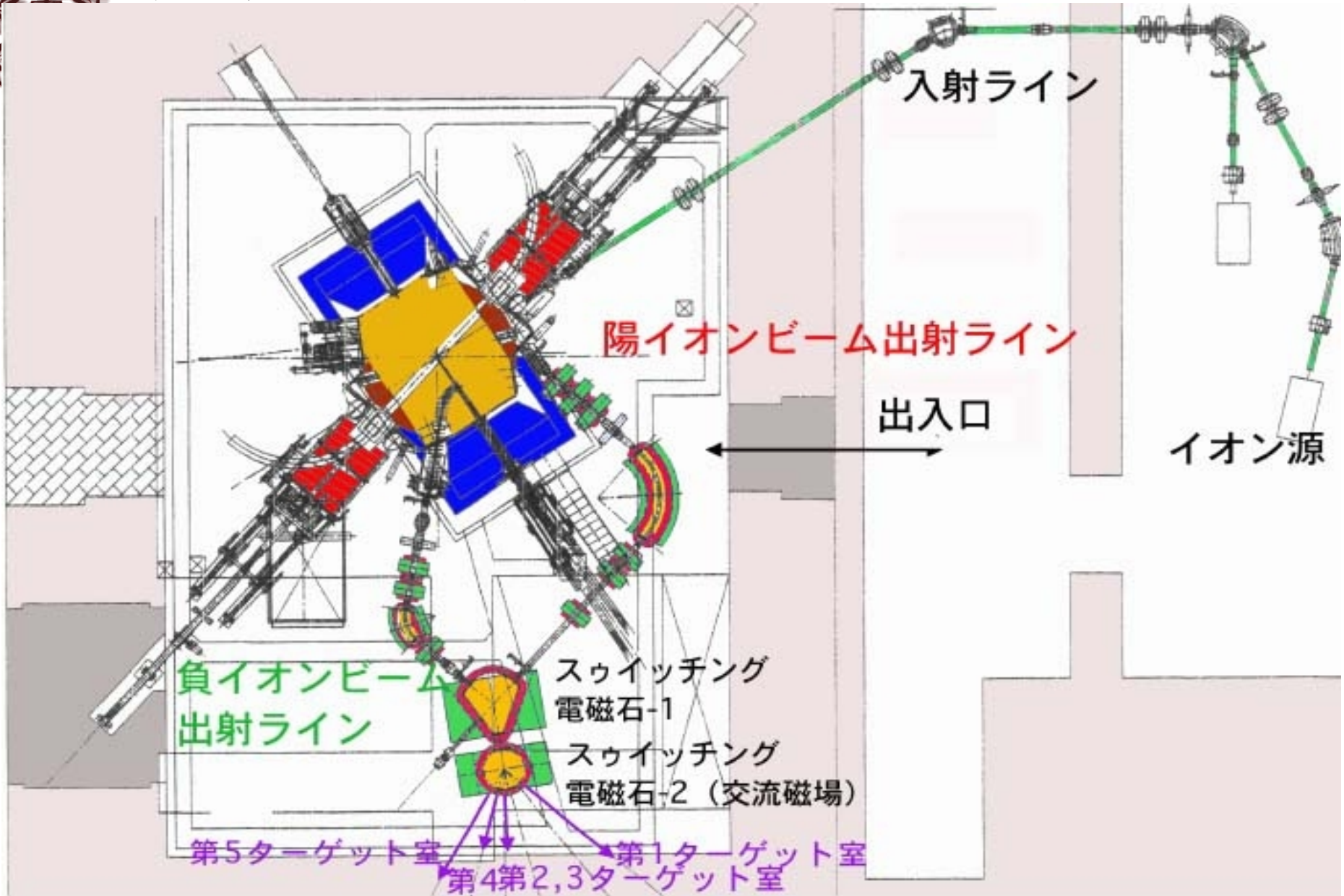
複数のターゲット室で、同時に実験が可能になる

医学利用は毎日出来る

更には

**大強度中性子ビームによる実験
(良質中性子ビーム、BNCTガン治療)**

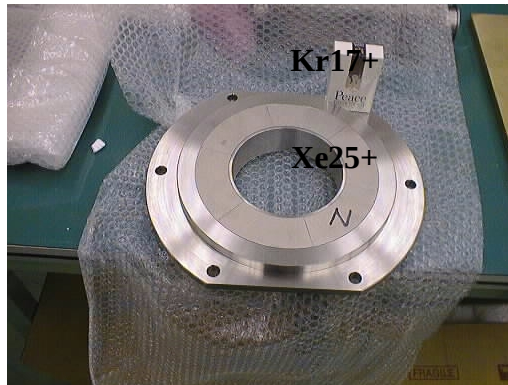
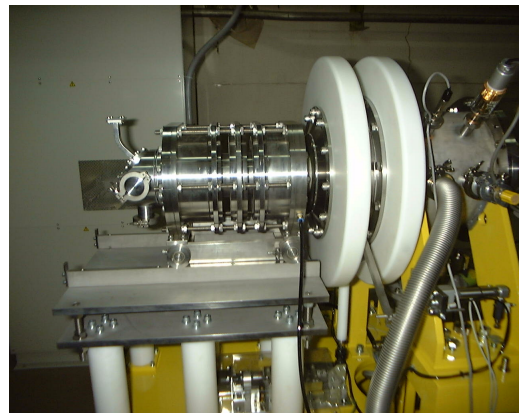
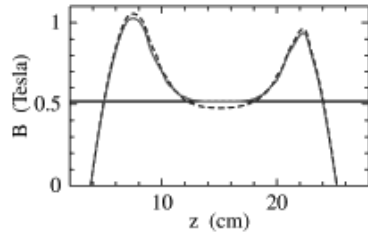
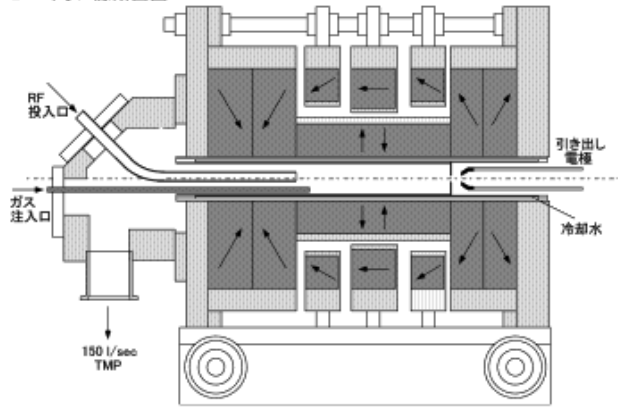
短寿命不安定核ビームが作れる





資料：永久磁石によるECR重イオン源
1st Sendai ECR Ion Source

ECRイオン源断面図



	NANOGAN 2	CYRIC new ECR
Bmax[T]	0.881	1.026 / 1.055
Bmin[T]	0.373	0.517 / 0.477
Weight of magnet [kg]	60	51.5
Inner dia. of Chamber [mm]	36	28
Total length [mm]	400	451
Outer dia. [mm]	260	362
Beam Current [μA]		
Ar8+	143	
Ar9+	60	
Ar11+	10	



1998/5 中心領域解体開始



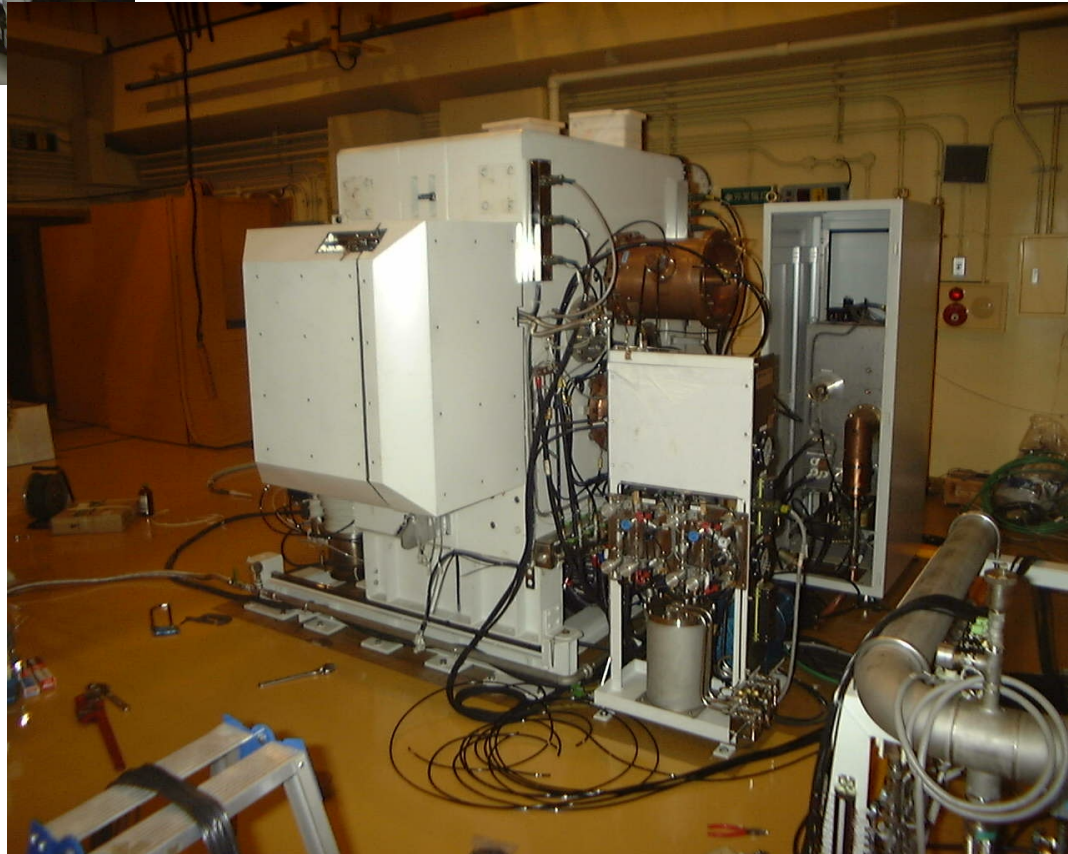


ヨーク解体、搬出





1998/8 第1ターゲット室





資料：680から930への更新（スライドショー）

1998/10 本体室工事本格化





資料：680から930への更新（スライドショー）

1998/12 新サイクロトロン用支柱補強





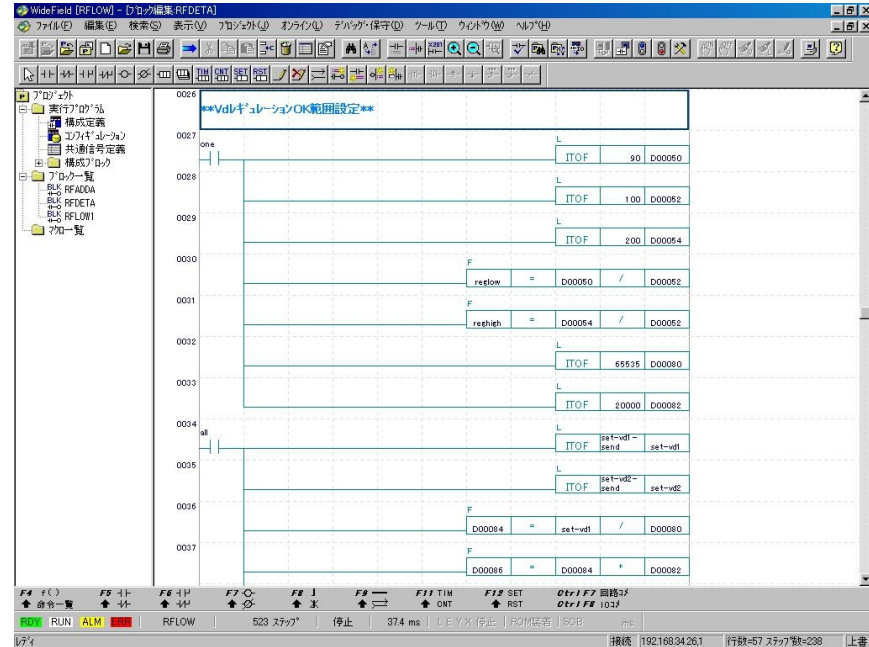
資料：680から930への更新（スライドショー）



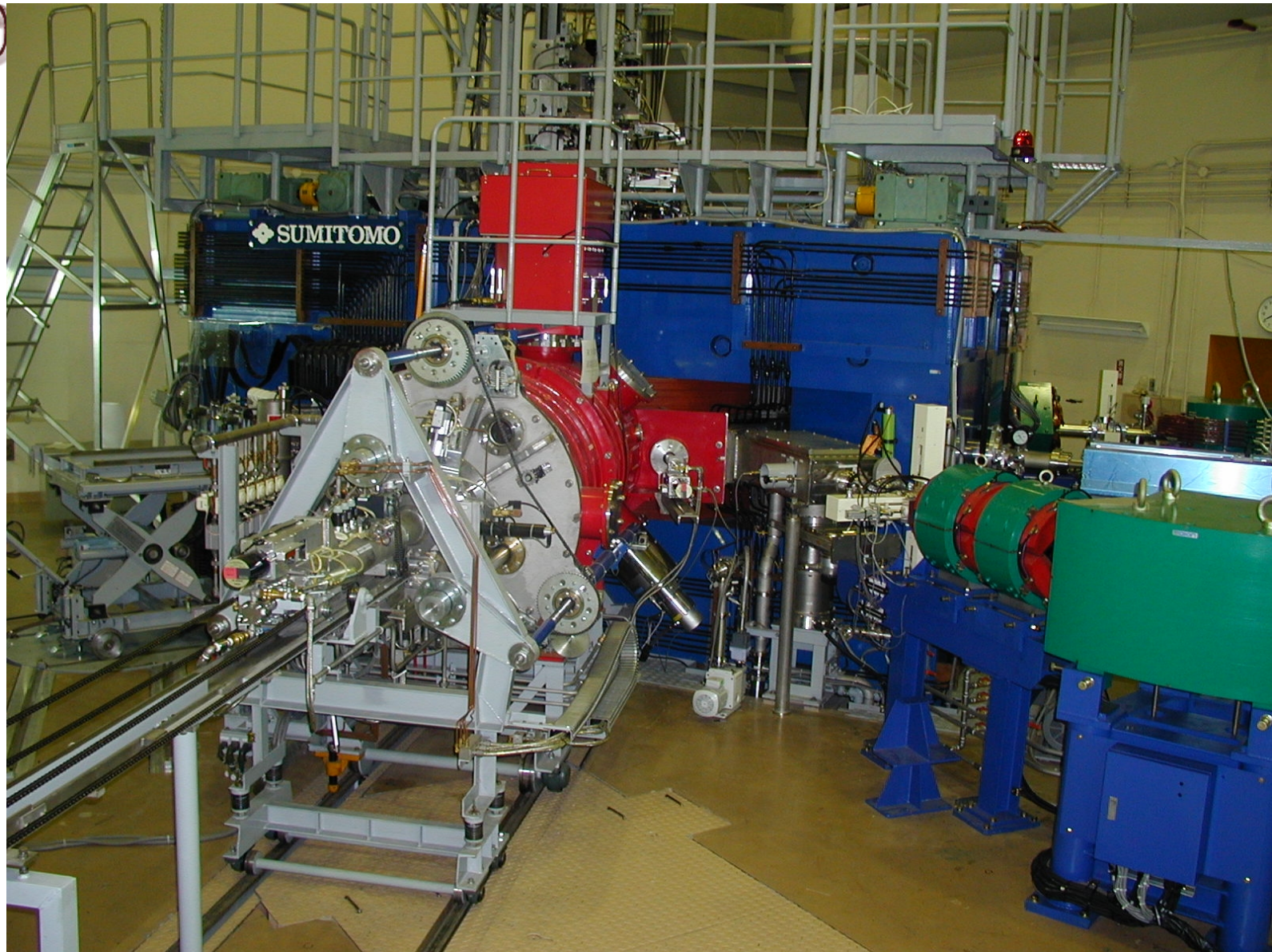


資料：680から930への更新（スライドショー）

制御用計算機 (PLC) とプログラム

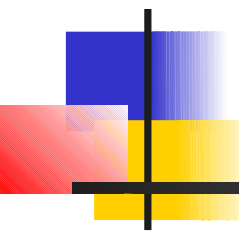


資料：680から930への更新（スライドショー）



資料：負イオン加速 (CYRIC 遠藤氏より)

H⁻ acceleration with AVF 930 Cyclotron



T. Endo, M. Fujita, Y. Miyashita, T. Shinozuka, A. Yamazaki
*Cyclotron & Radioisotope Center, Tohoku
University, Sendai, 980-8578, Japan*

S. Chiba, S. Kan, A. Matsumura, Y. Omiya, S. Yokokawa

*SHI Accelerator Service Ltd.,
5-9-11, Kitashinagawa, Shinagawa-ku, 141-8686, Japan*

T. Honma
*National Institute of Radiological Sciences
4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555, Japan*



資料：負イオン加速 (CYRIC 遠藤氏より)

The Purpose of this work.

High Intensity proton beam

The goal: 300 μ A, 10~50 MeV

at 930 AVF Cyclotron(renewed in 1999)

For users in

Physics: *study of neutron rich unstable nuclei in IGISOL.*

study of (n,p) reaction by the fast neutron beam.

Engineering: *thermal or epithermal neutron source.*

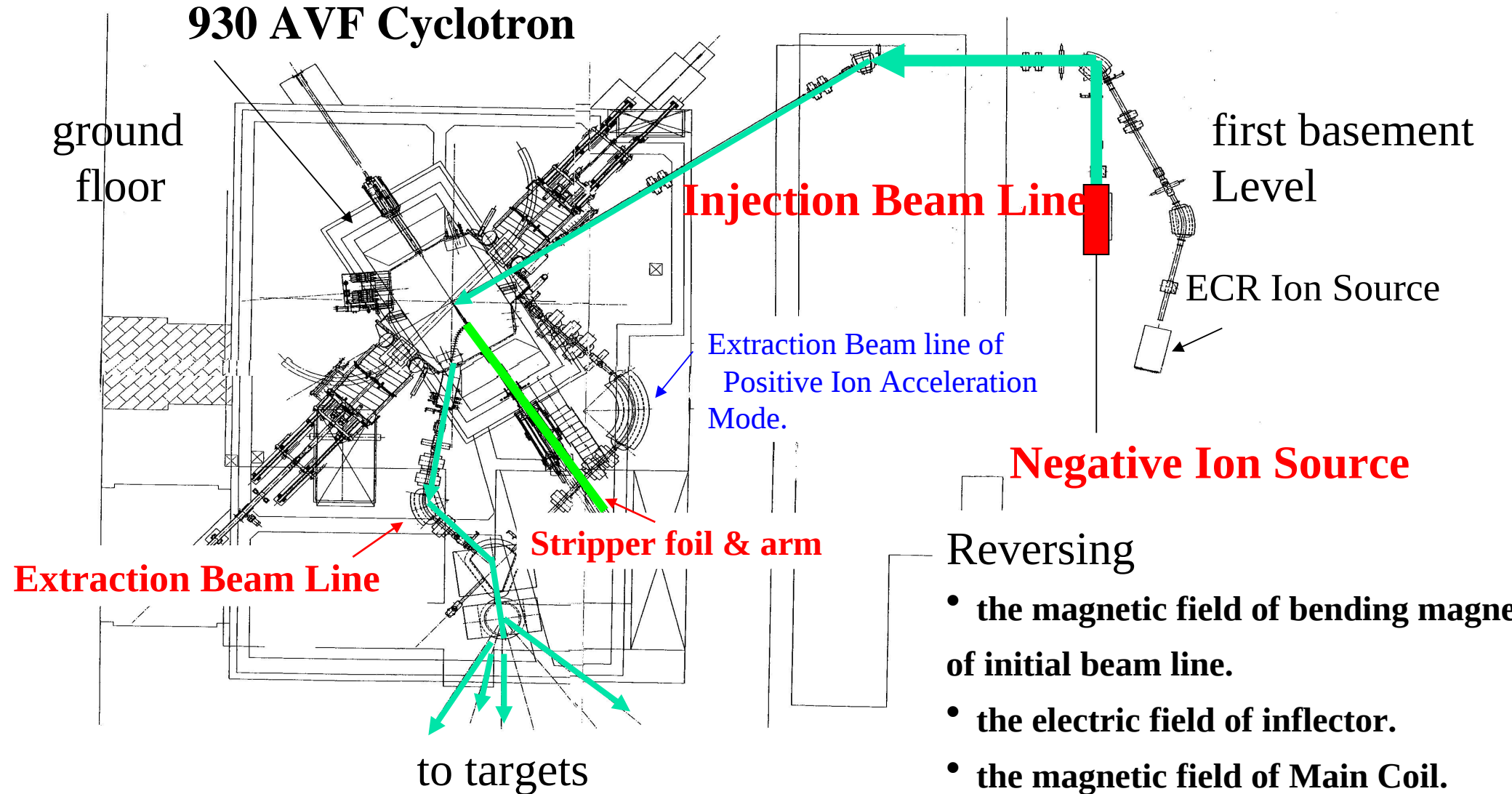
Medicine, Pharmacy:

study of Neutron Capture Therapy.

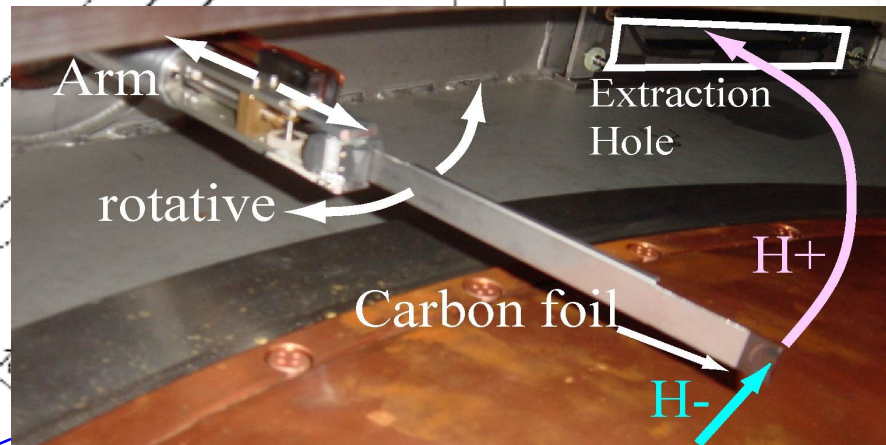


資料：負イオン加速（CYRIC 遠藤氏より）

The course of beam for H⁻ acceleration.

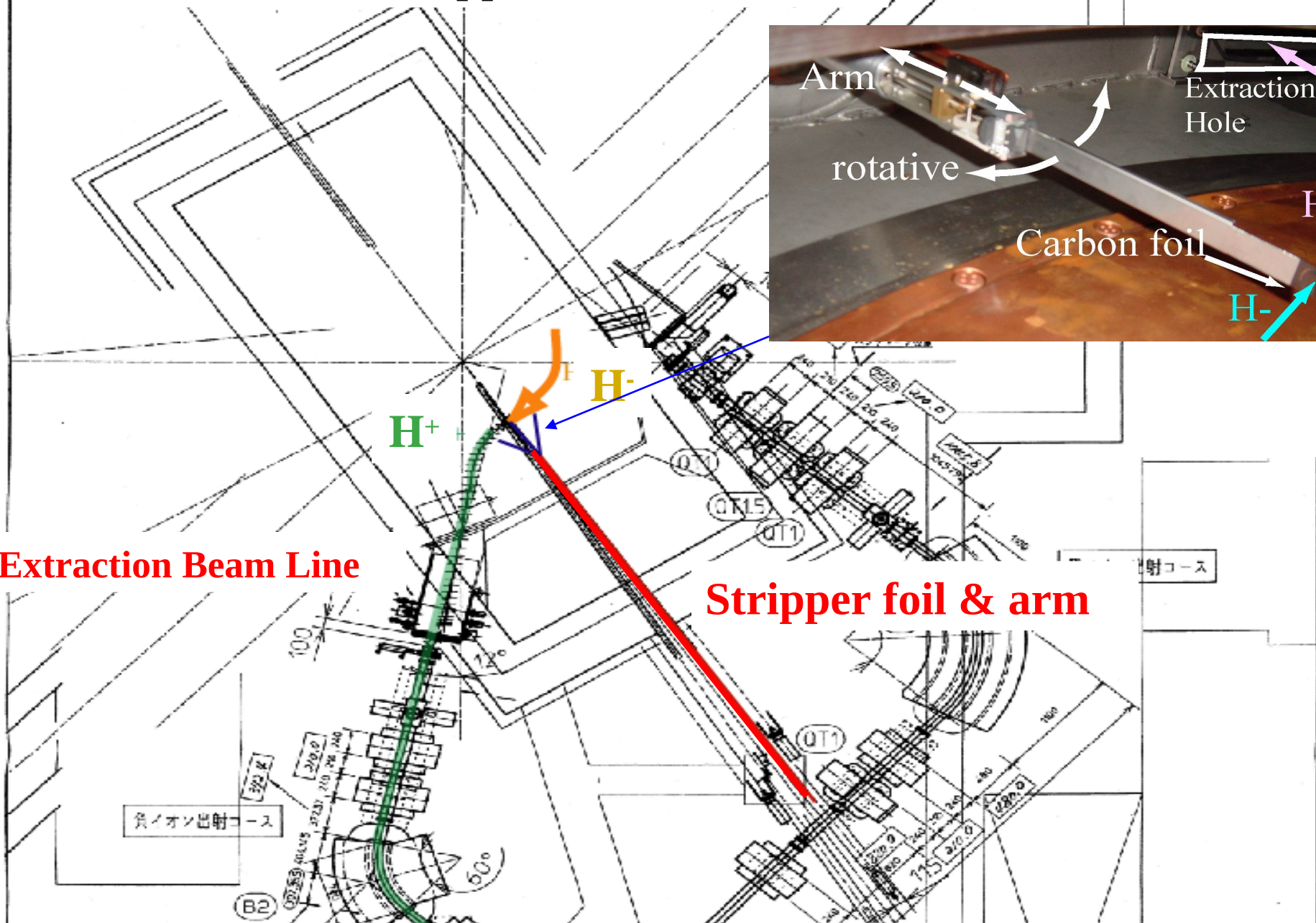


資料：負イオン加速 (CYRIC 遠藤氏より)
Around the stripper foil & arm



Extraction Beam Line

Stripper foil & arm



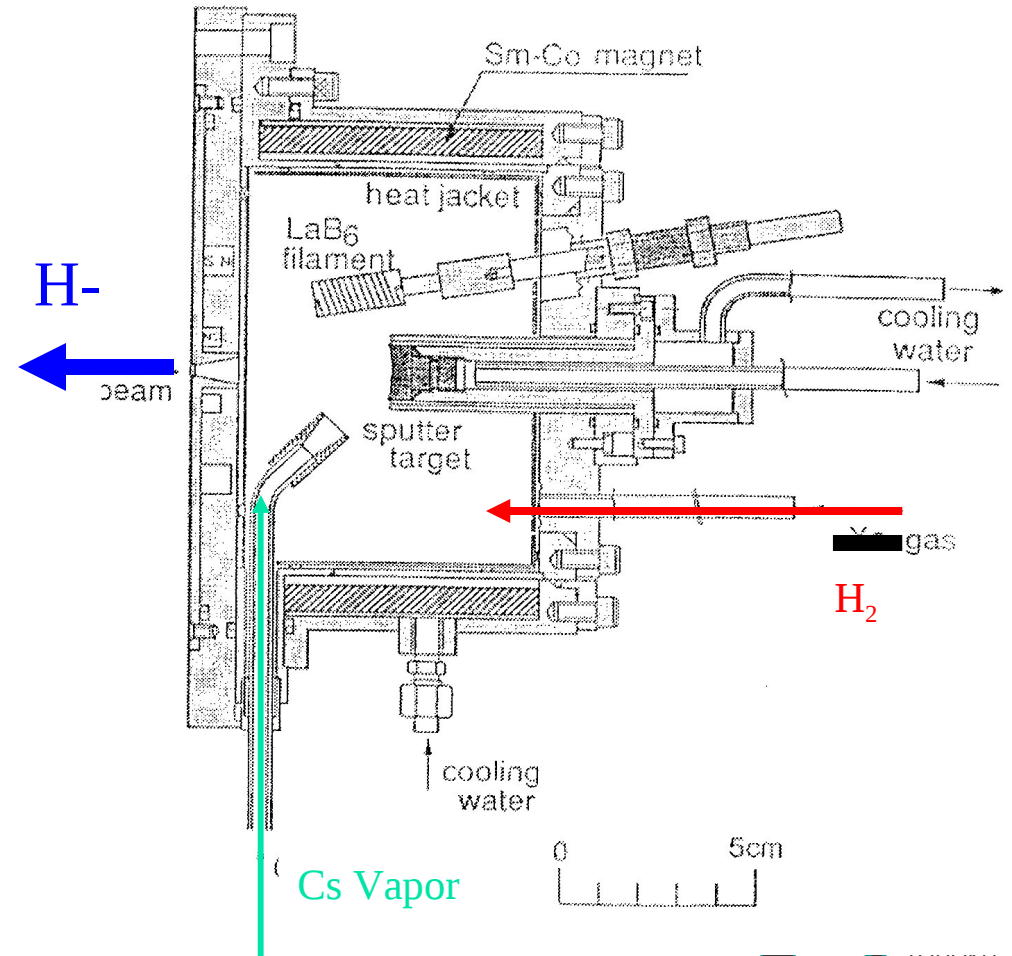
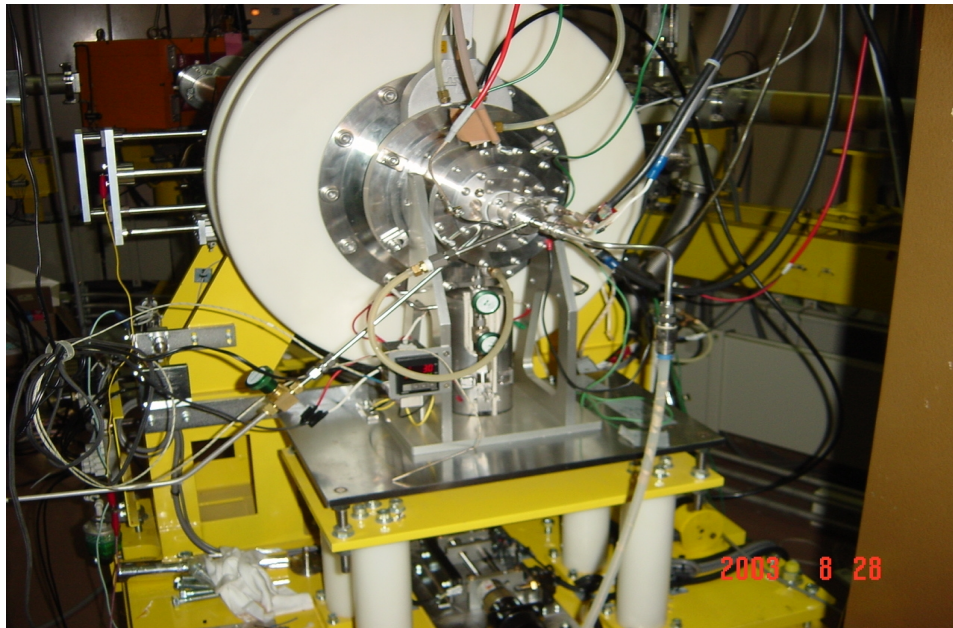


資料：負イオン加速（CYRIC 遠藤氏より）

Multicusp type Ion Source

(BLAKE V, Y.Mori, Rev.Sci.Inst. 65(1994)4p)

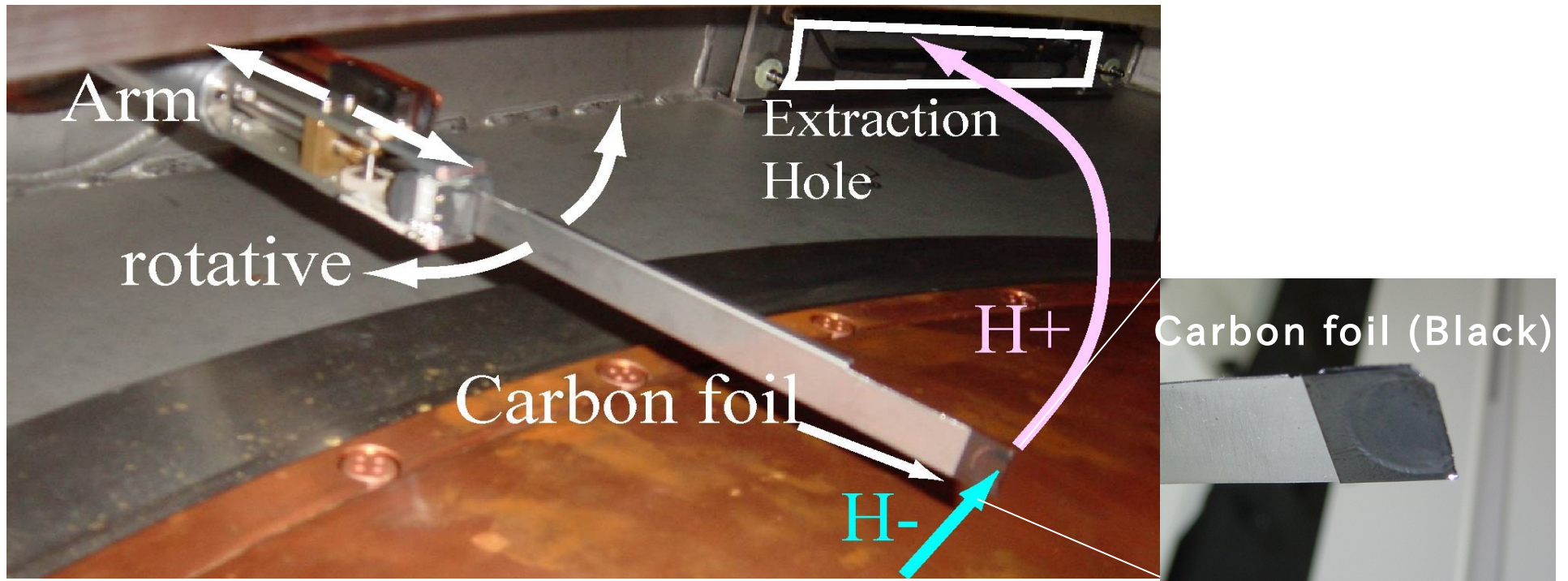
H⁻ 350 μ A Continuous Beam.





資料：負イオン加速（CYRIC 遠藤氏より）

The stripper carbon foil on moving arm.



The thin carbon foil($50\mu\text{g}/\text{cm}^2$), on the tip of arm, strips H^- of electrons($\text{H}^- \rightarrow \text{H}^+$).

The arm moves in the directions of two dimensions.



Typical acceleration status

• Injection beam line	Current	Efficiency
ion source	300 μA	1
inlet of cyclotron	100 μA	0.33
main probe(R=100mm)	30 μA	0.1
•	Current	Efficiency
main probe (R=780mm)	26 μA	1
before bending magnet	25 μA	0.96
after bending magnet	23 μA	0.88
Junction of beam lines	22 μA	0.84



資料：加速器中性子によるBNCTの検討（CYRIC 馬場氏より）

中高エネルギービームを用いたBNCT 加速器中性子源の工学設計

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター
馬場 護，海野泰裕，糸賀俊朗

放射線医学総合研究所 米内俊祐

エンジニアリング開発（株）田原義壽

新型炉技術開発（株）横堀 仁

CONTENTS

1. はじめに：BNCTとは
2. 基本設計とベンチマーク実験
3. 工学設計
4. まとめ



資料：加速器中性子によるBNCTの検討（CYRIC 馬場氏より）

ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）

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

- ・ 腫瘍に取り込まれるホウ素薬剤の投与（BSH, BSA），中性子照射
- ・ $^{10}\text{B}(n, \alpha) ^7\text{Li}$ ； 細胞程度の飛程，細胞レベルの選択性
⇒ 浸潤性を持つ脳腫瘍などに特に有効

中性子源

- ・ 原子炉
- ・ 加速器

アクセス・立地

病院との併設

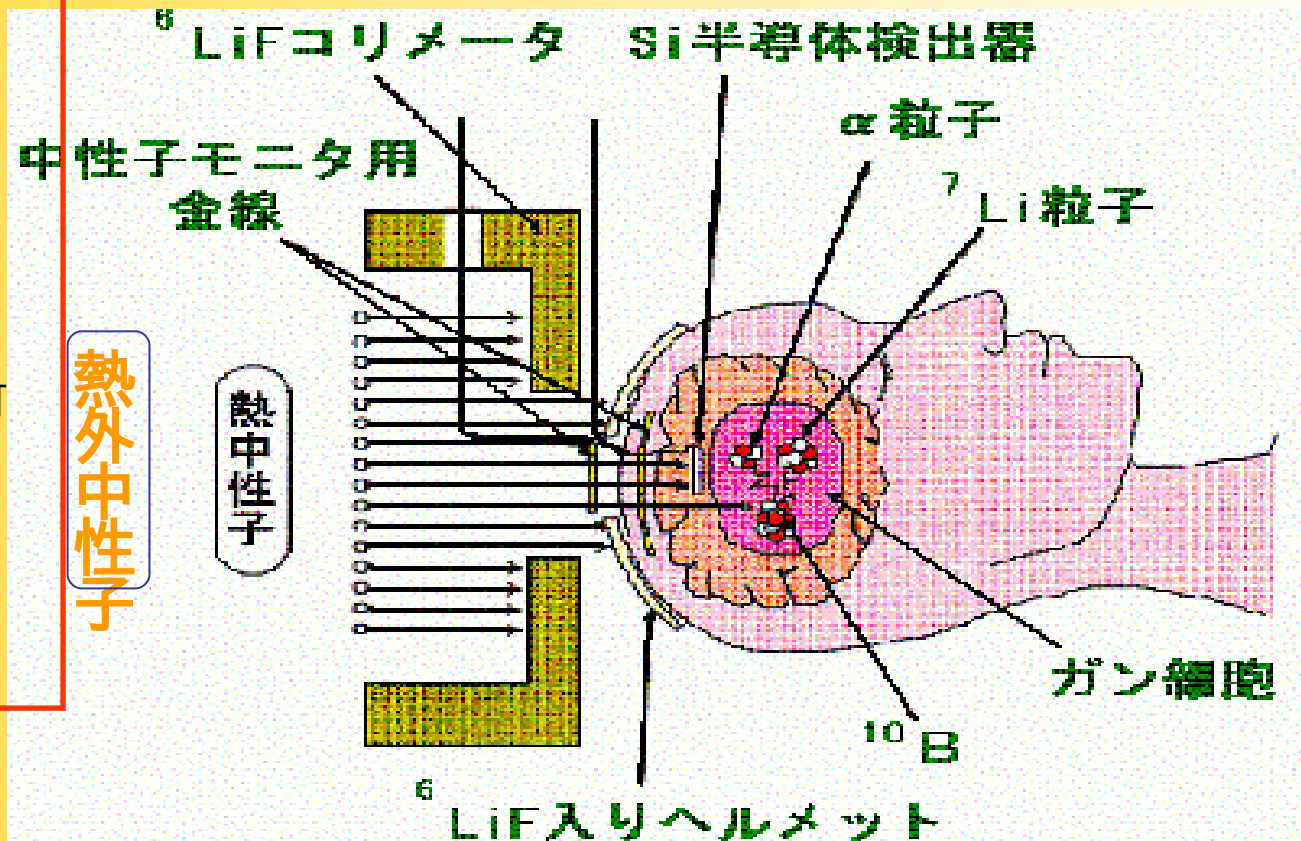
中性子スペクトルの最適化可

能

始動・停止の容易さ

世界各国で設計研究

まだ実現せず





BNCT用中性子場の現状

➤現在の臨床試験：原子炉中性子場

- ・熱中性子：術中照射
- ・熱外中性子：非開頭手術可、深部腫瘍の治療が可能

➤BNCT用中性子場の条件

- ・中性子束強度： $\geq 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}$
(1時間以内の治療終了)

- ・中性子エネルギー分布
熱外（右図）

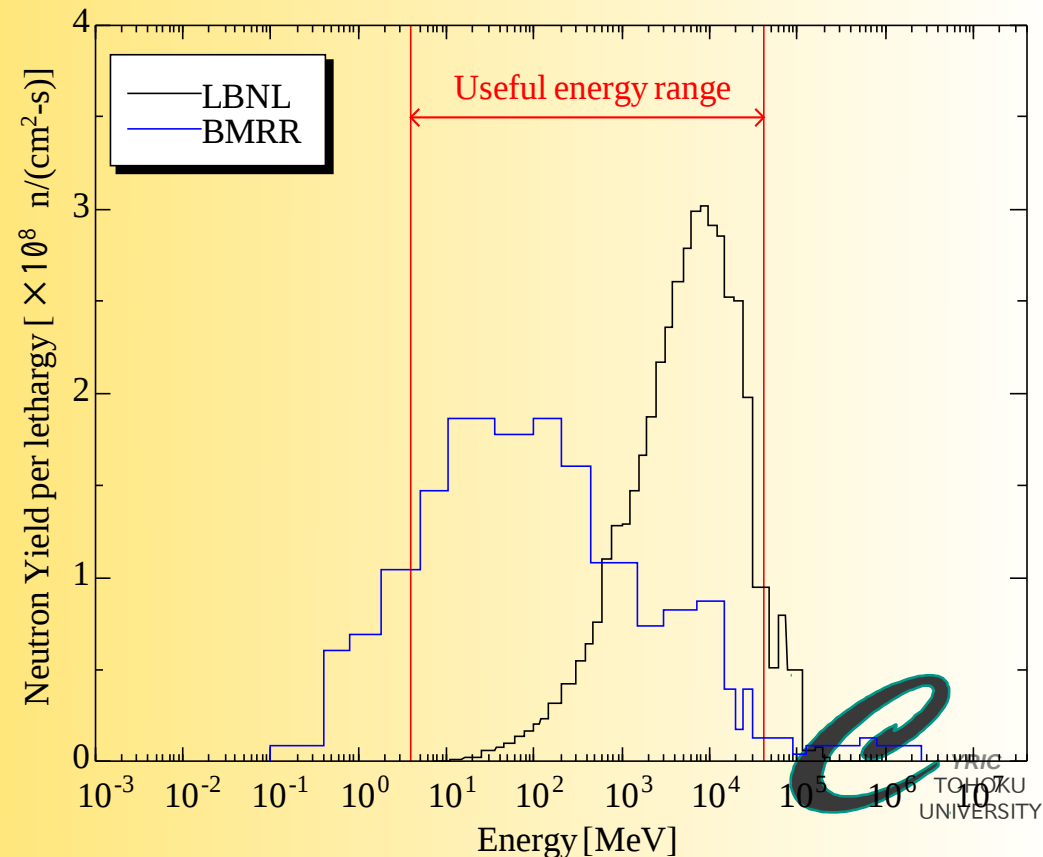
高エネルギー成分少

正常組織の損傷 $\text{H}(n,p)$

Fig:原子炉中性子場と加速器中性子場の照射中性子エネルギースペクトルの比較

LBL (Lawrence Berkeley National Laboratory) :D.L. Bleuel et al: Med. Phys., 25, 1725-1734 (1998).

BMRR (Brookhaven Medical Research Reactor) :J.A. Coderre et al.: J. Neuro-Oncol., 33, 93-101 (1997)





BNCT用加速器中性子場の困難

BNCT 用加速器中性子場の設計研究

Neutron-Production Reaction	Accelerated Energy [MeV]	Beam Current [mA]	Heat Load [kW]	Emitted Neutron energy [MeV]	Group
${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	1.9	10	19	0.03-0.09	Kyoto
	1.95	>5	10		MIT
	2.4	20	48	<0.8	LBNL
	2.3-2.5	10	23-25		OSU
${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$	0.4	5000	200	2.43	LBNL
${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$	0.12	1000	120	14.1	LBNL

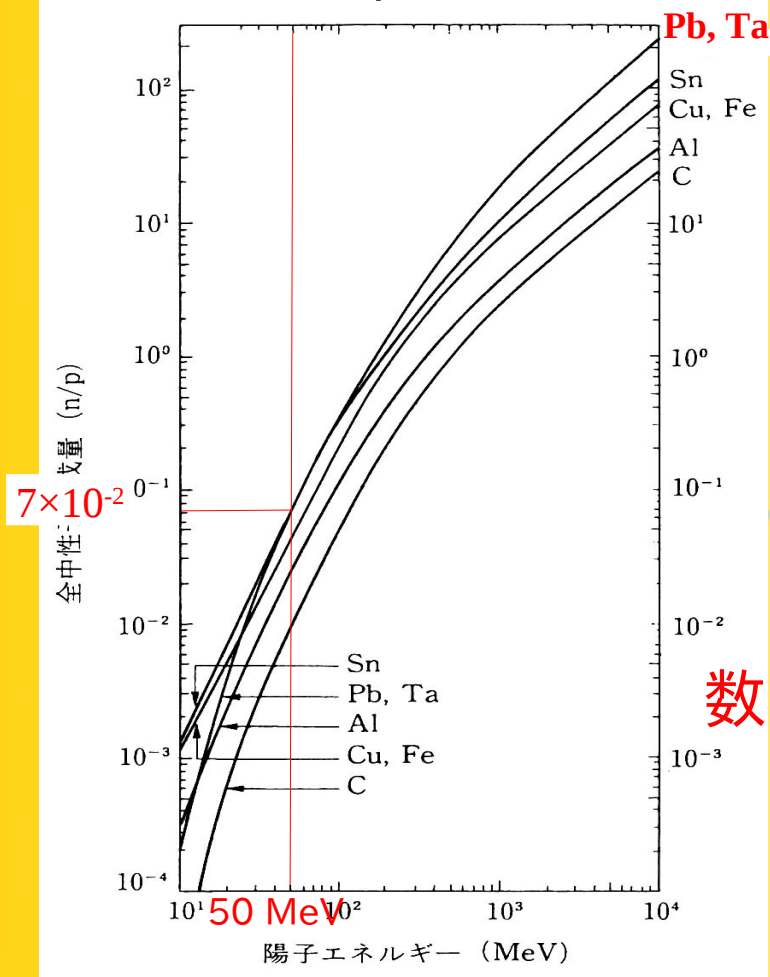
主な原因：

1. 治療に必要なビーム電流を満たす加速器が存在しない
2. 中性子生成ターゲットの熱除去, 健全性の問題



中高エネルギー加速器を用いたBNCT用中性子場

生成中性子はEpの2乗に比例



数百～数千倍

Li(p,n)
Neutron yield from thick Target
(D.L. Bleuel et al, LBL-37983, Revision1, 1996)

Ep [MeV]	Total Neutron Yield [n/p]
2.1	2.69×10 ⁻⁵
2.2	5.45×10 ⁻⁵
2.3	9.26×10 ⁻⁵
2.4	1.23×10 ⁻⁴
2.5	1.46×10 ⁻⁴
2.6	1.68×10 ⁻⁴

Figure : Total neutron yield from several thick targets bombarded by protons on incident proton energy as a function of incident proton energy .

(K. Tesch, Radiat. Prot. Dosim., 11, 165, 1985)



2. 基本設計とベンチマーク実験

➤ 中高エネルギー加速器の利用の可能性

1. 現実性の高さ

- ・ ターゲットの熱負荷、熱密度の低下
- ・ 利用可能な加速器の存在

IBA社Cyclone C30（陽子30MeV、350-1500 μ A）

東北大学CYRICの住友重機K-130サイクロトロン

（最大出力（計画）：陽子50MeV、300 μ A）

2. 検討課題

- 1) 中性子強度（治療時間との関係）
- 2) 中性子スペクトル

・ エネルギー， ・ 高エネルギー成分の割合

- 3) 計算精度の検証 ⇒ ベンチマーク実験による研修

BNCT用中性子場の概念設計



- 治療に有効な照射中性子エネルギー領域： 4 eV to 40 keV
(J.C.Yanch et al., Radiation Research 126, 1-20, 1991.)
- 治療に必要な照射熱外中性子束： $0.5- 1 \times 10^9$ [n · cm⁻² · s⁻¹]
(IAEA TECDOC 1223, 2001.)

- 中性子生成反応：
 - ✓ 高い中性子生成量
 - ✓ 低い高エネルギー中性子混入率
- 減速材：
 - ✓ 治療に有効な熱外中性子に整形

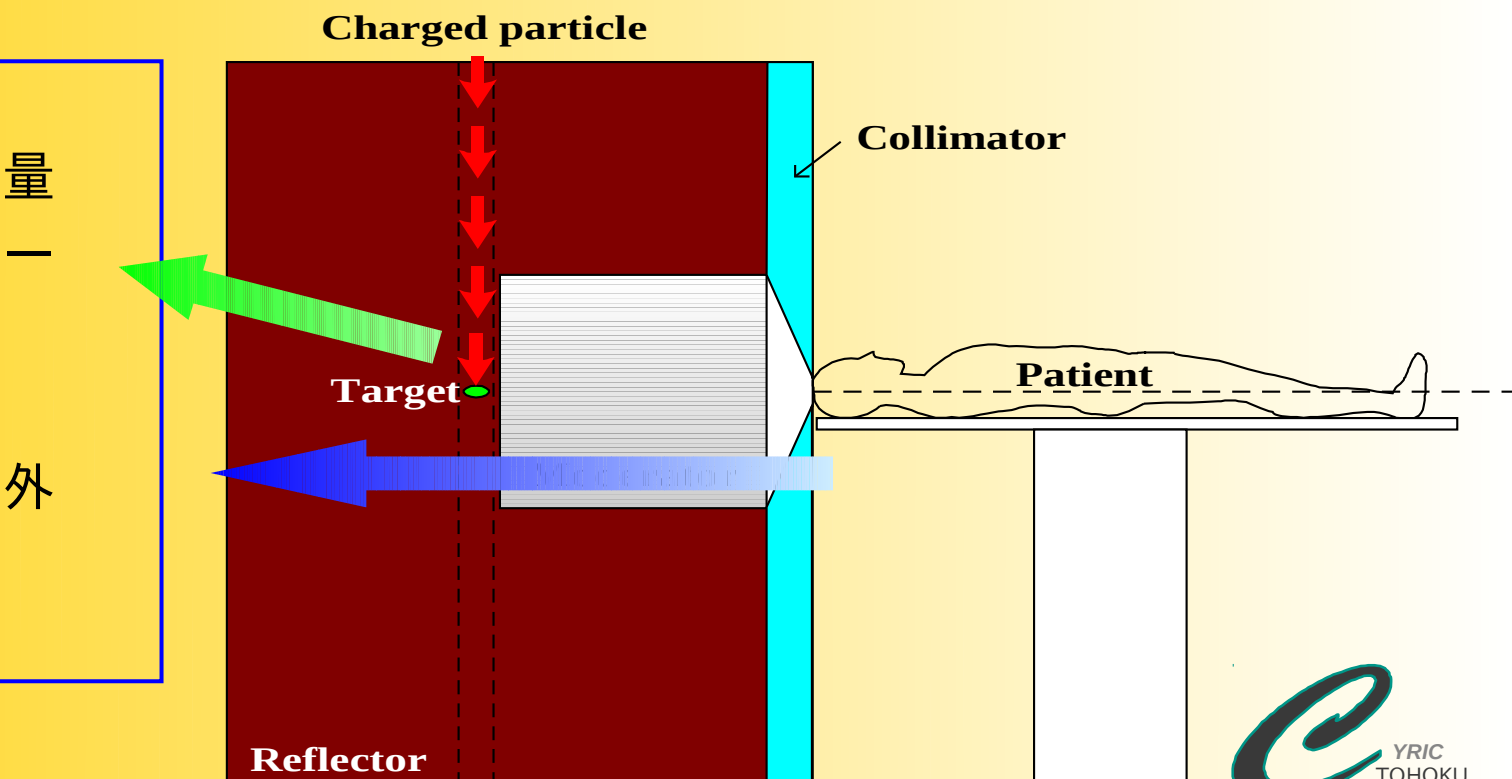


Fig: 加速器BNCTの概念図



中性子生成反応の選択

ねらい

- ・ 高い中性子生成量、
- ・ 低い高エネルギー中性子混入率

1. 重核の核破砕反応

Pb(p,n), W(p,n), Ta(p,n)など

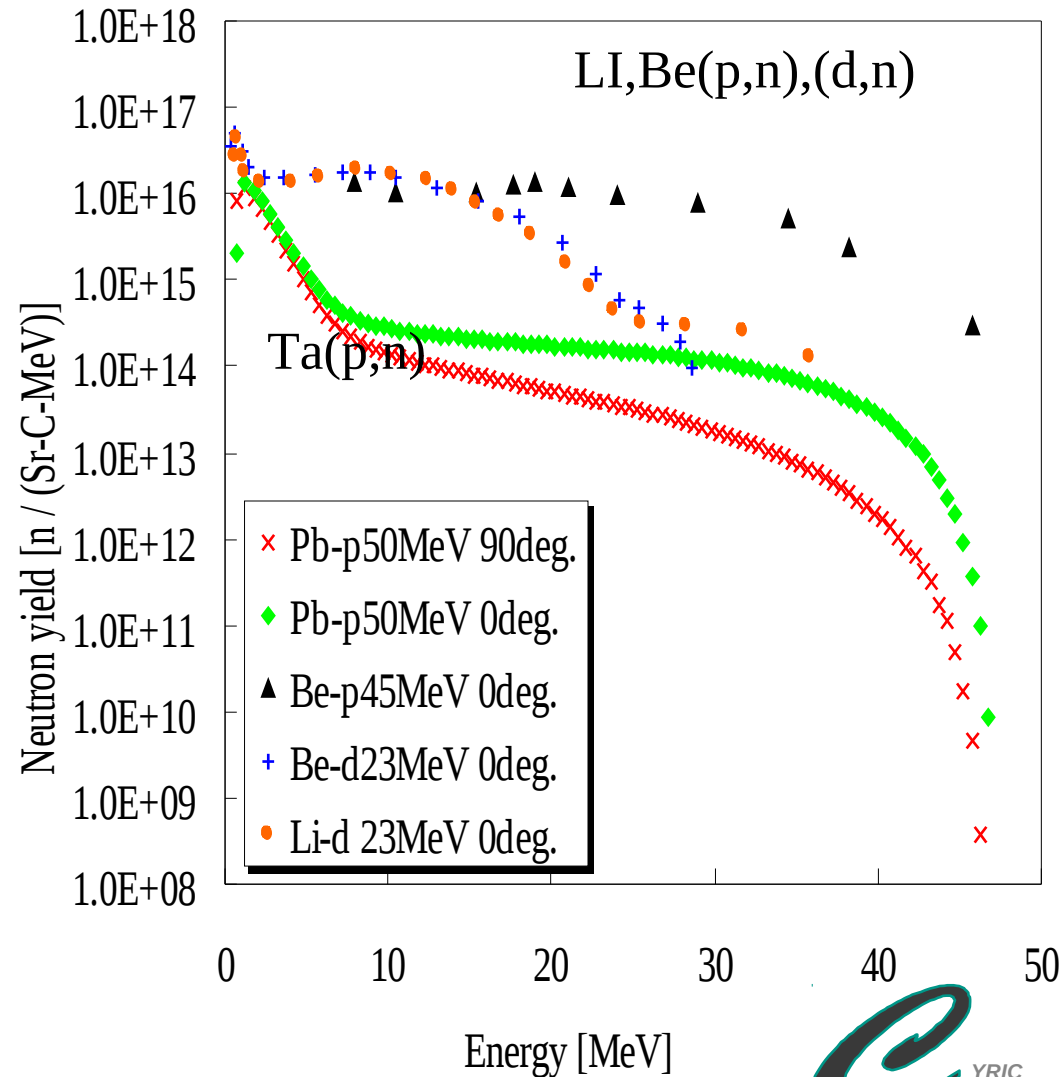
2. Be(p,n), Be(d,n), Li(d,n)反応

核的条件：

核破砕反応の採用
後方角への中性子の利用

物性的条件

融点，水との反応性から
Ta を第1候補とする。





減速材の選択

- 中高エネルギー加速器の使用
 - ⇒ 高エネルギー中性子の高い混入率
 - ⇒ **高エネルギー中性子減速材**の採用

1. 高エネルギー中性子減速材 (ビーム上流)

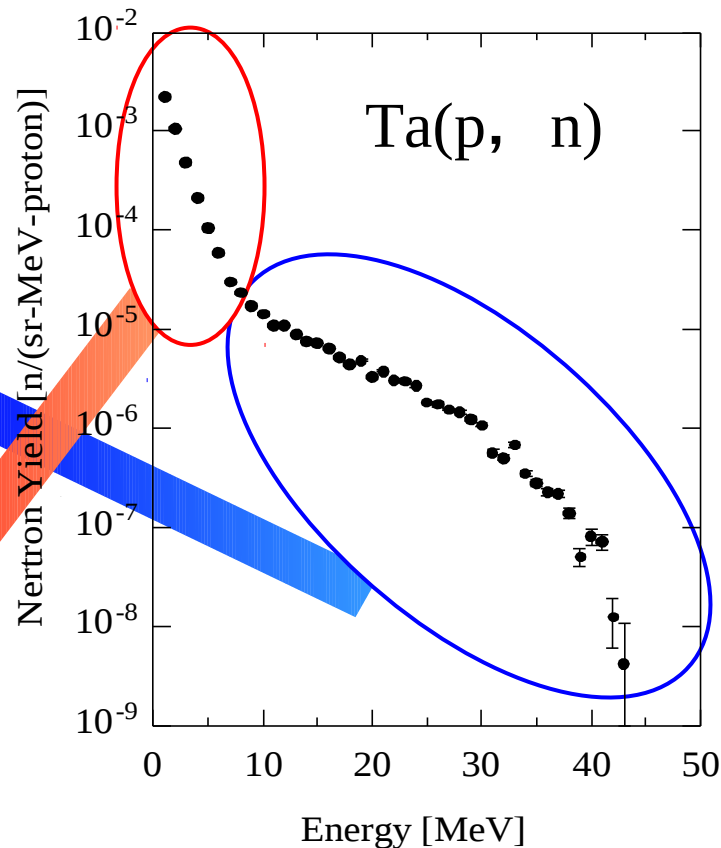
- ✓ Pb : 大きい(n, 2n)反応断面積
- ✓ Ni : 大きい(n, p), (n, α)反応断面積
- ✓ Fe : 860keV以上で大きい非弾性散乱断面積
20keV付近に断面積のへこみ

2. 熱外中性子フィルター (ビーム下流)

- ✓ FLUENTAL*1

(AlF₃:69 wt%, Al:30 %, ⁶LiF:1 %の混合物)

(本研究では積層で使用)

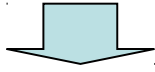


*1 I. Auterinen et al, Proceedings of the CLINCT BNCT Workshop, TKK-F-A718, Helsinki, 14-24, 1993.



中高エネルギービームを用いたBNCTの検討

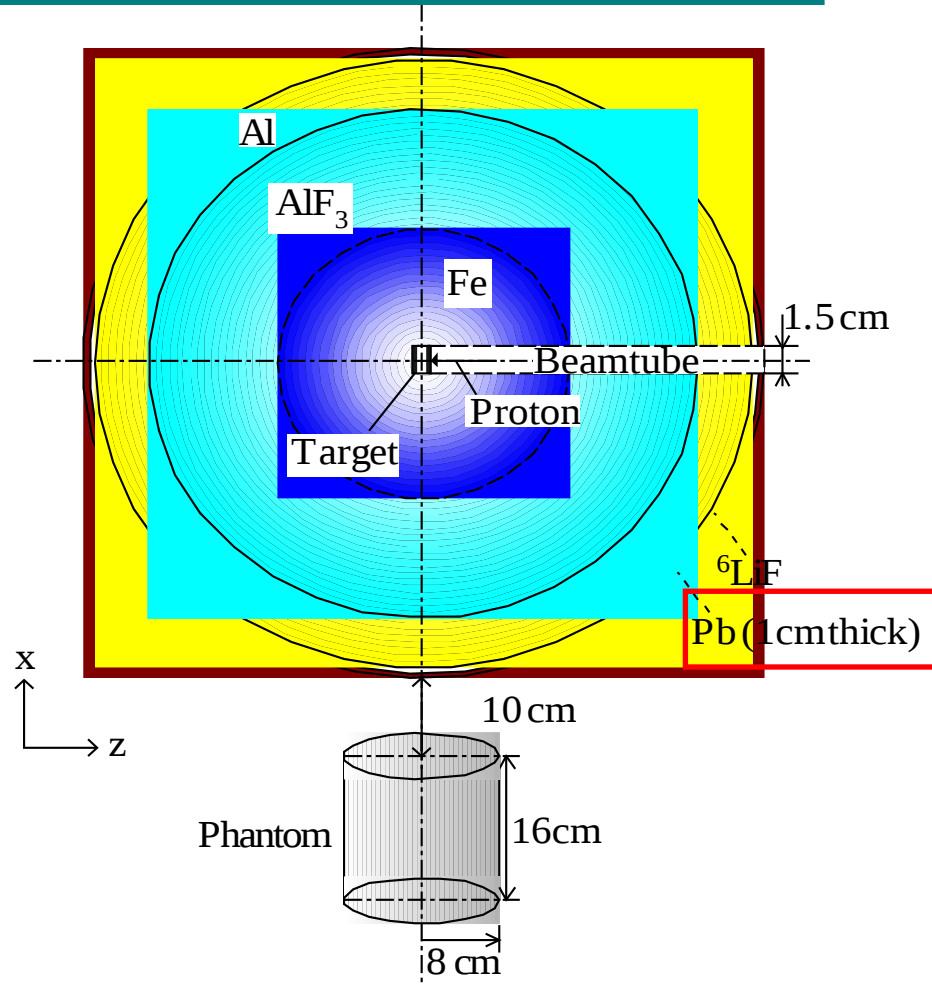
1. 治療用中性子束の強度
2. 中性子の質
 - ・ エネルギー
 - ・ 高エネルギー成分比



腫瘍，正常組織の線量

Table: Main elemental compositions and density of average soft tissue for male of ICRU 46.

Element	Ratio by mass [%]
H	10.5
C	25.6
N	2.7
O	60.2
Density [g/cm ³]	1.030



✓ファントム：
Average Soft Tissue (M) (ICRU46)
0.5cm深さ毎に区切られた円筒形





資料：加速器中性子によるBNCTの検討（CYRIC 馬場氏より）

他の加速器に対する適応性の検討

核破碎中性子源：

“低エネルギー中性子スペクトルはエネルギーに依らない”

検討した陽子エネルギー

- ✓ 30-70MeV：他の中高エネルギー加速器
- ✓ 230MeV：陽子線治療用加速器
- ✓ 600MeV：J-PARCの線形加速器

検討内容：

1. ファントム内線量深さ分布

⇒50 MeV 陽子の値と比較

2. 1時間で治療を終了するためのビーム電流

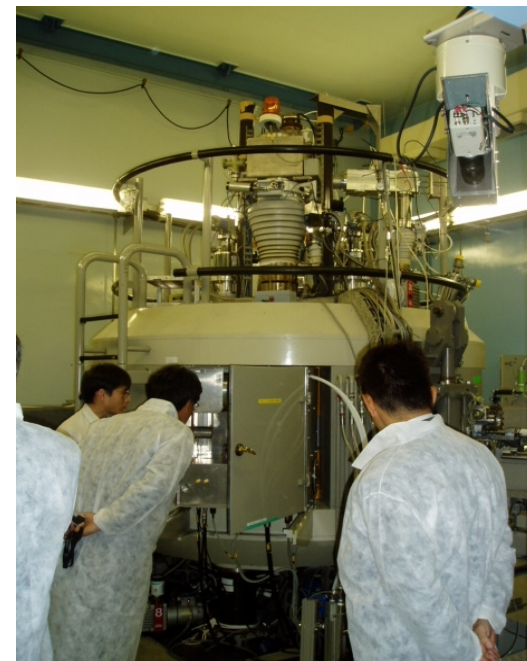
⇒ BNCTの可能性

・ IBA社Cyclone C30：

30 MeV, 350-1500 μ A

・ J-PARCの線形加速器：200 kW

(600 MeV加速時の最大強度)





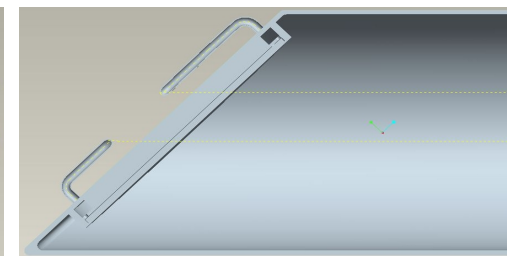
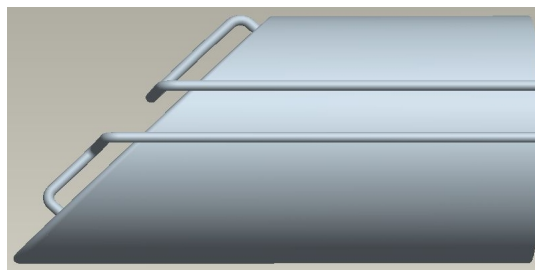
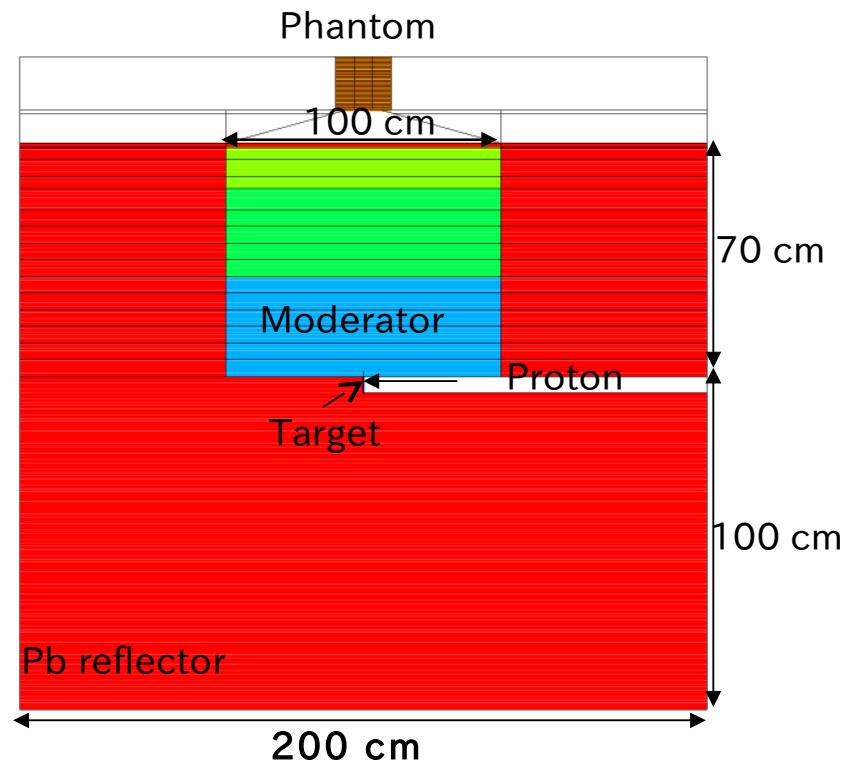
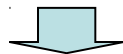
工学設計

検討課題

1. 中性子発生ターゲット冷却系を含む実際の体系の検討
1. γ 線遮蔽、コリメータの最適化

1. 詳細モデル計算
減速材，冷媒，冷却構造
2. 熱流体計算
温度分布
3. 機械的ストレス・応力計算

工学的成立性の検証

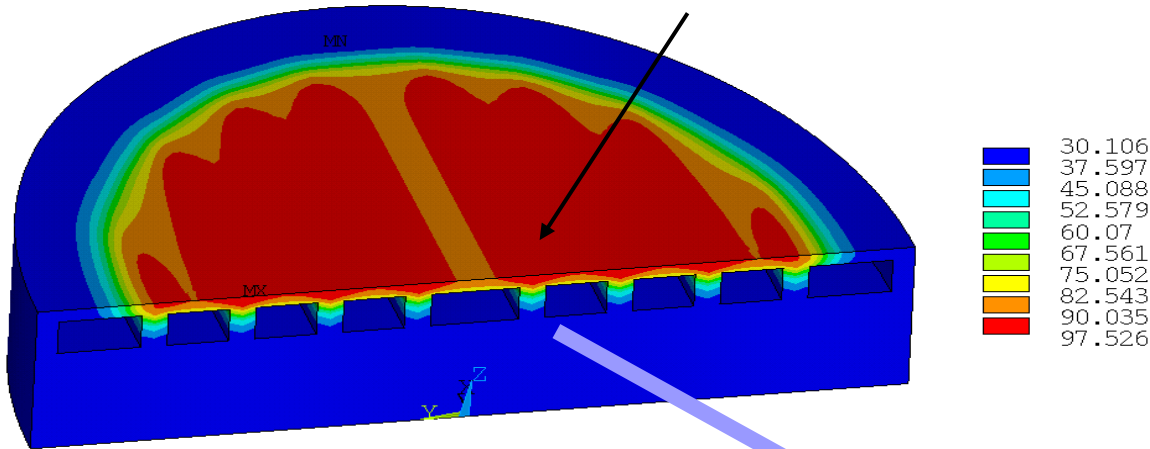




資料：加速器中性子によるBNCTの検討（CYRIC 馬場氏より）
ターゲット評価—温度・ストレス解析—

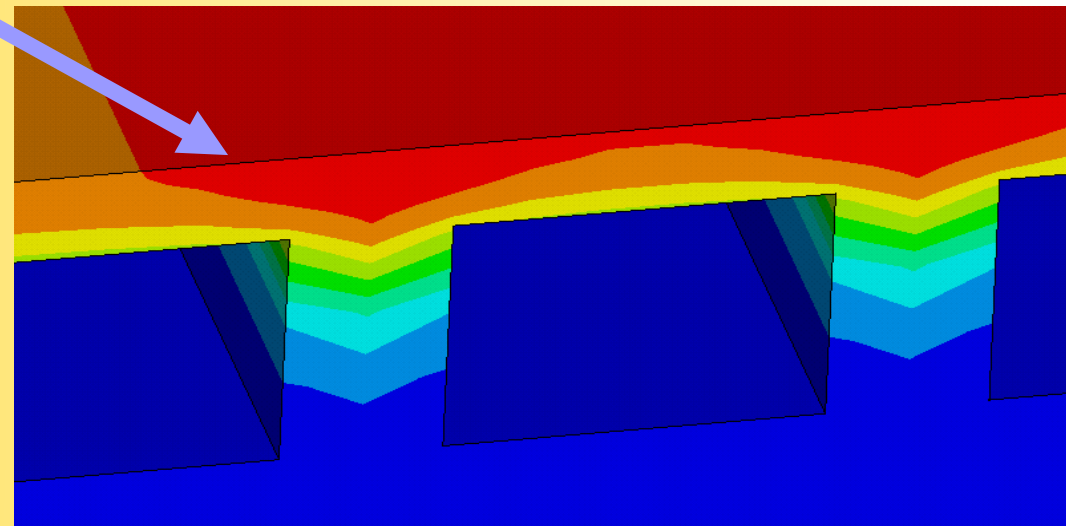
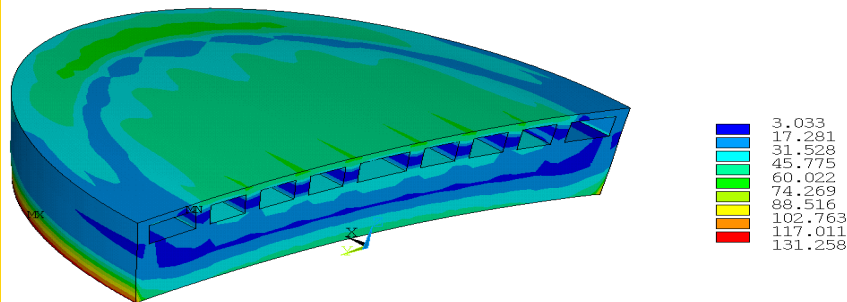
ターゲット表面温度分布評価

最高温度：98°C (<融点2985°C)



拡大

最大応力：131MPa

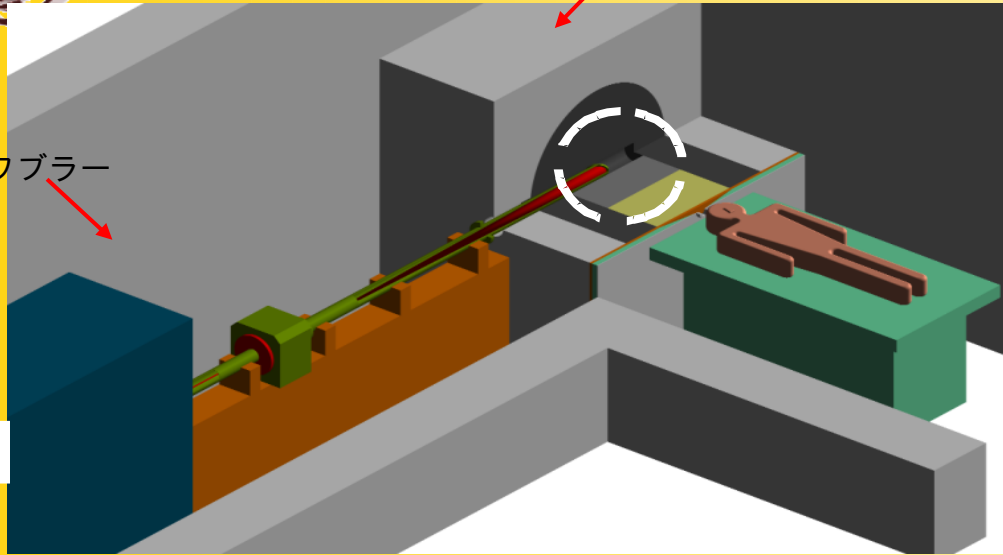




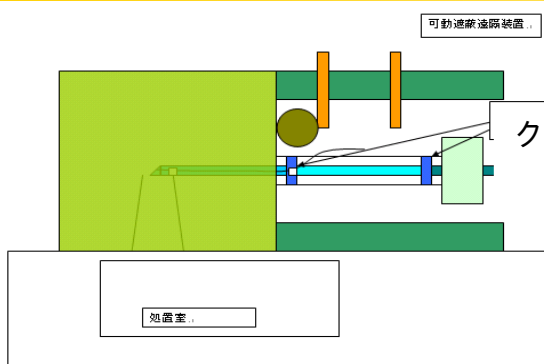
ターゲット/冷却系

ワブラー

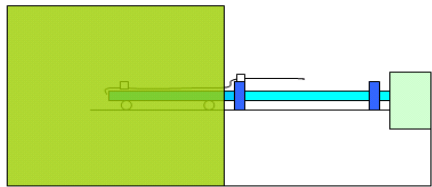
加速器



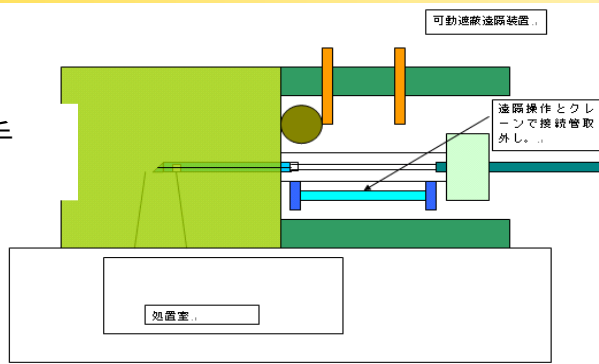
ターゲットのメンテナンス



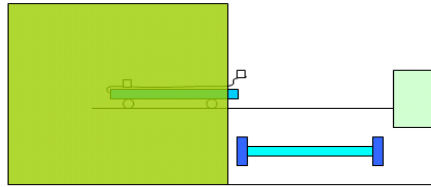
平面図



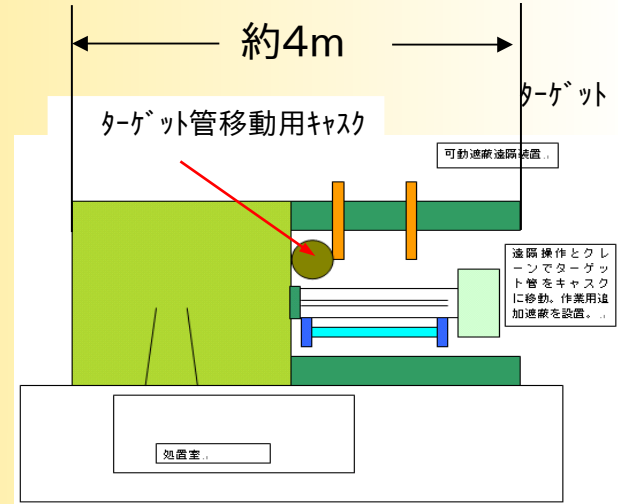
立面図



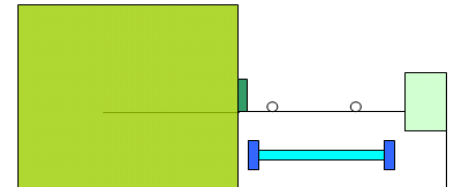
平面図



立面図



平面図



立面図

遠隔操作とクレーンでターゲット管をキャスクに移動。作業用遠隔遮蔽を設置...



4. まとめ

1. 中高エネルギー陽子を用いたBNCTシステムの設計
 - 核的設計
 - 工学的設計
2. Pb, W, W(p,n)核破砕反応を用いたシステムの可能性
 - 幅広い加速器システムへの適応可能性
 - ・ 市販の加速器
 - ・ 陽子線治療用加速器
 - ・ JPARC
3. 具体的システムの構想



検討結果

1. 30-70 MeV陽子

- ✓ 50MeV陽子の場合と同じ減速体系を用いて同等のファントム内線量分布
- ✓ 30MeV陽子に対する必要なビーム電流：500 μ A程度
⇒IBA社Cyclone C30で達成できる

2. 230MeV陽子

- ✓ 高エネルギー中性子減速材が50cm程度で、
50MeV陽子の場合と同等のファントム内線量分布
- ✓ 数-10 μ A程度のビーム電流で実現可能

3. 600MeV陽子

- ✓ 高エネルギー中性子減速材が70cm程度で、
50MeV陽子の場合と同等のファントム内線量分布
- ✓ 必要ビーム電流：数 μ A ⇒J-PARCの線形加速器で達成できる

4. 1時間で治療を終了できるビーム強度

- ✓ 30-230 MeV：陽子エネルギーが高いほど低下
- ✓ 600 MeV：230 MeVの場合より増加

⇒数100 MeVで飽和し、これ以上のエネルギーを用いても熱負荷に有利ではない。



結論

1. 中高エネルギー加速器を用いたBNCT用中性子場の概念設計とその可能性を検証した。
 - ✓ 中性子生成反応：Ta(p,n)反応 ($E_p=50\text{MeV}$, $300\ \mu\text{A}$) (90度方向)
 - ✓ 減速材：Fe+AlF₃/Al/⁶LiF
2. 下記の実験によりシミュレーション計算の妥当性を検証した。
 - ✓ 中性子エネルギースペクトル測定
 - 多減速材低エネルギー中性子スペクトロメータを開発した。
 - ✓ アクリルファントム内熱中性子束分布測定
 - ✓ 減速材透過中性子による吸収線量測定
3. ターゲット冷却システムを含んだ現実的な体系における検証を行った。
4. 他の加速器に対する適応性の検証を行った。

利用可能な加速器の使用を前提とした上で、中性子生成ターゲットの健全性を確保した実現性の高いBNCT用加速器中性子場を初めて提案した。



大強度高速中性子コースの開発

CYRIC測定器研究部 岡村弘之

測定器研究部・放射線管理研究部・
理学研究科中間エネルギー 協カプロジェクト

CYRIC 930 の特徴 …… 大強度 p, d ビーム（負イオン加速）

⇒ RI 製造

二次粒子（破碎反応、中性子）

直線コース（32コース）に高速中性子ビーム生成コースを整備
数10～90 MeV

利用目的

•半導体素子試験

Software Error Rate (SER)

•中性子誘起反応

•小数系反応

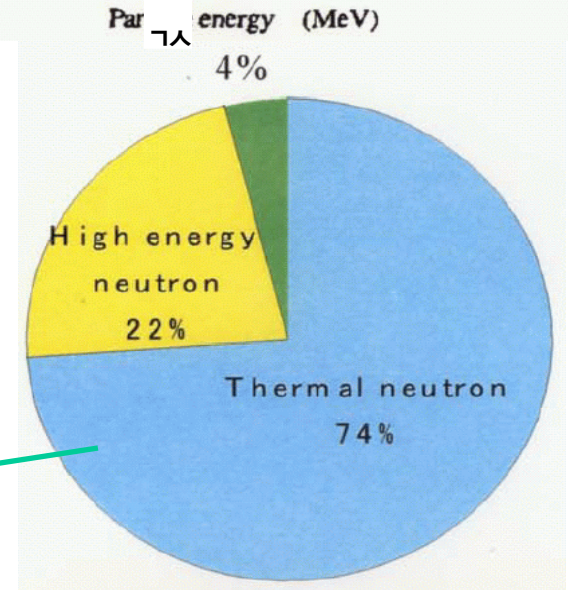
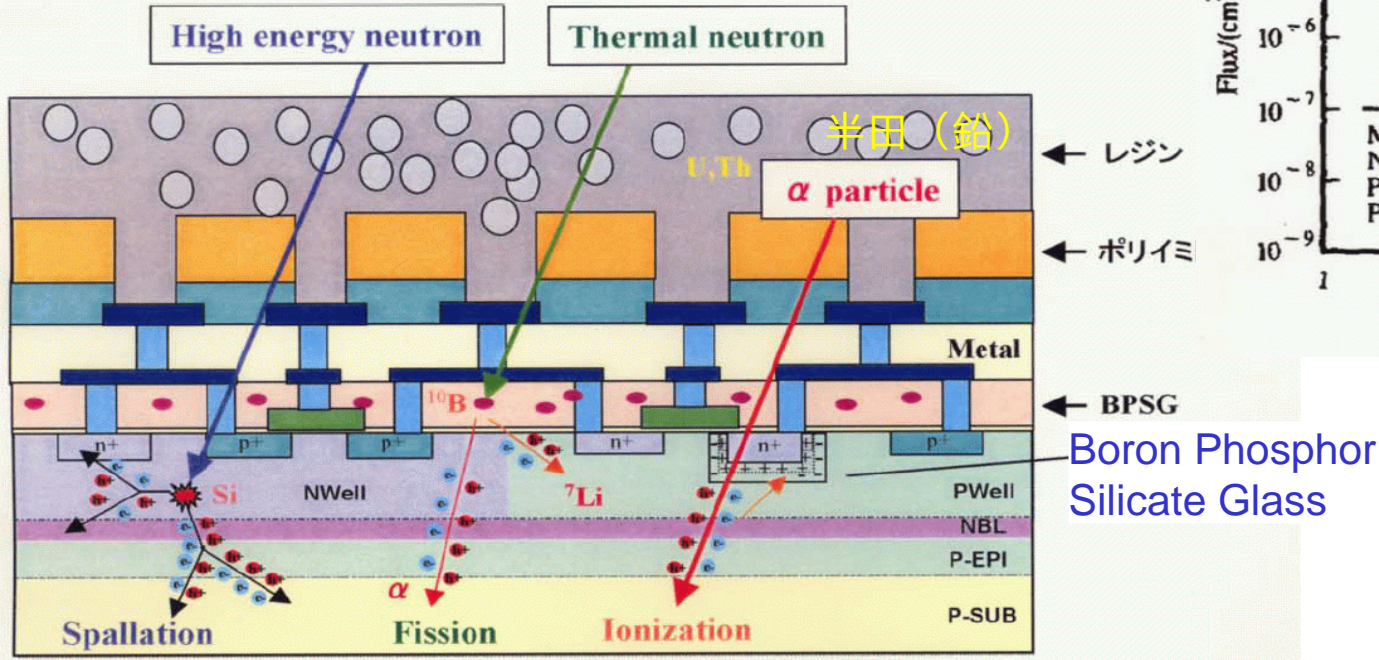
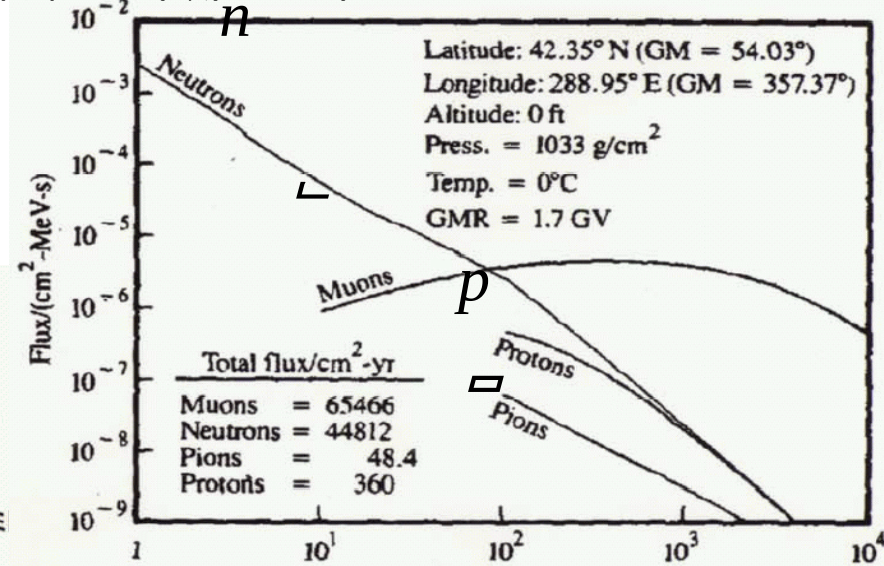
etc.

資料：大強度高速中性子コースの開発（CYRIC 岡村氏（故）より）



ソフトウェア発生メカニズム

宇宙線起原 …… 主に中性子



次世代LSI …… BPSG無し製造工程

熱中性子ソフトウェアは 1/600

⇒ 高速中性子が支配的寄与

加速器施設での半導体素子耐環境試験が重要 ⇒ ビジネス

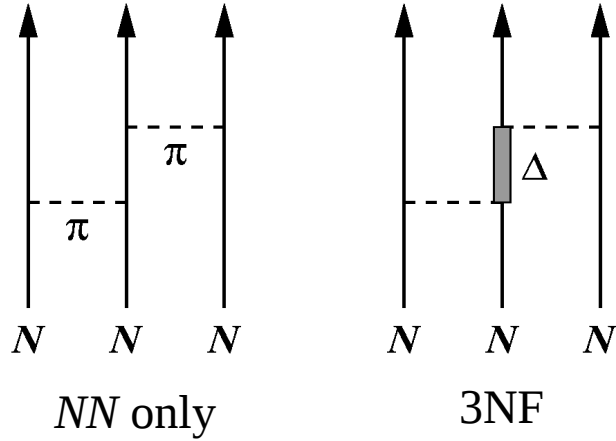
SONY 0.18μm Rule
8Mbit SRAM





Three-Nucleon Force (3NF) Effect

One of many-body effect (medium effect, off-shell, ...)



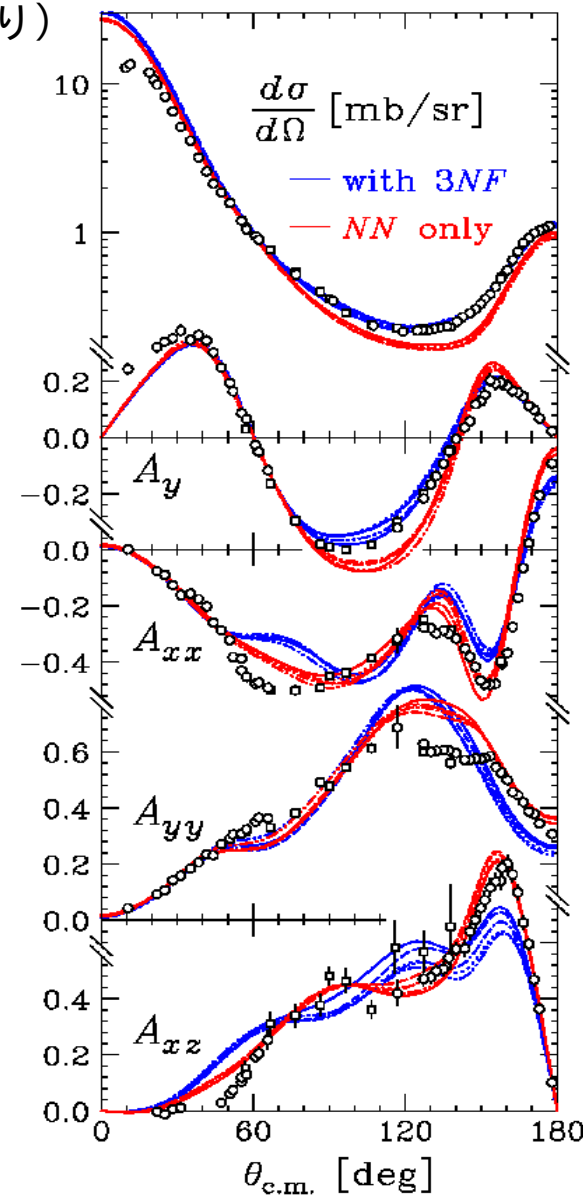
${}^3\text{He}$, triton E_B
 \equiv
 $d+N$ scattering
 dynamical info.

Modern & realistic
 $N-N$ interaction
 +
 Faddeev equation

— | high-precision data
 \equiv
 3NF

{ can't treat Coulomb
 non-relativistic

neutron scattering
 @ relatively low-energy
 ~ 70 MeV

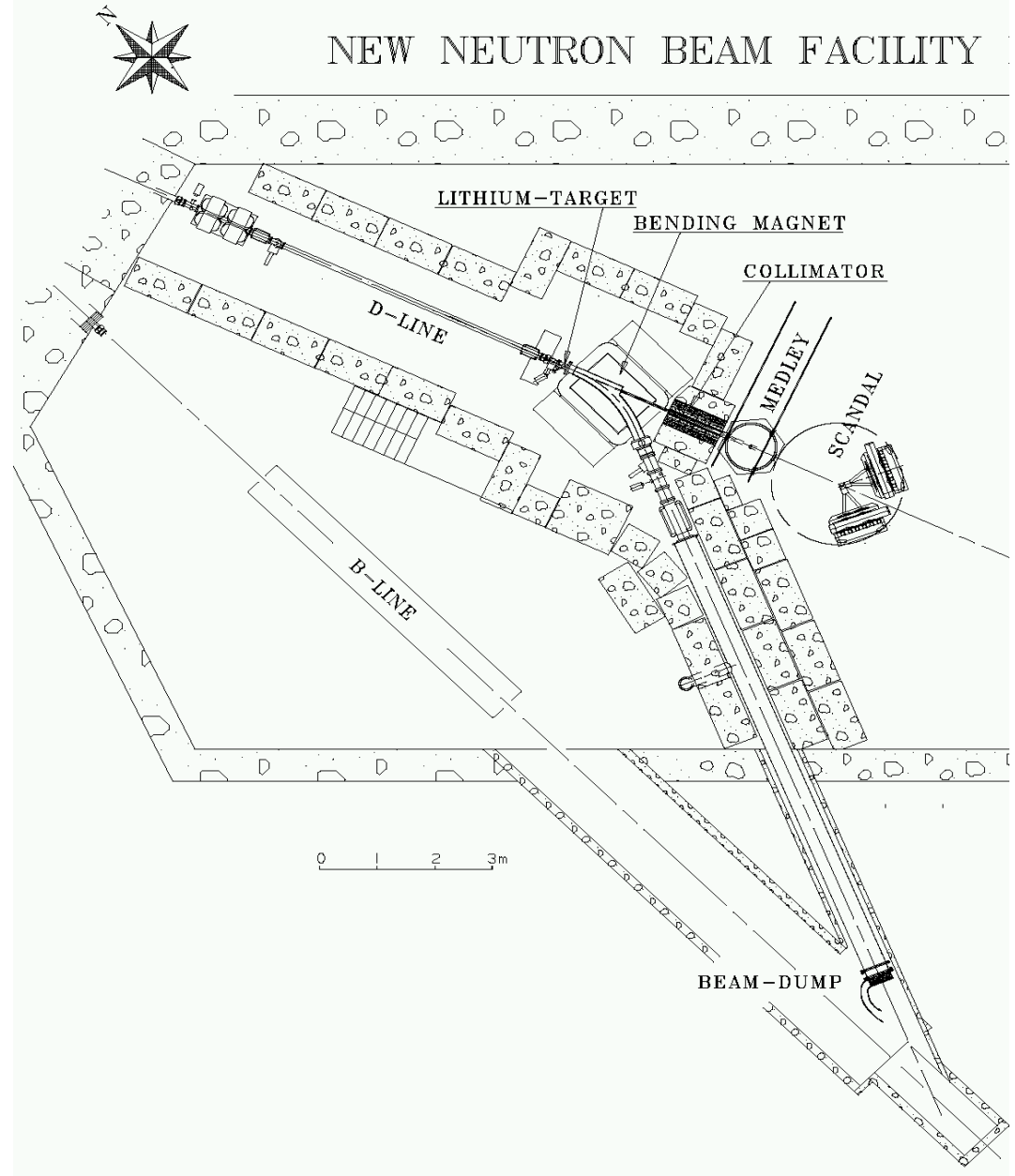
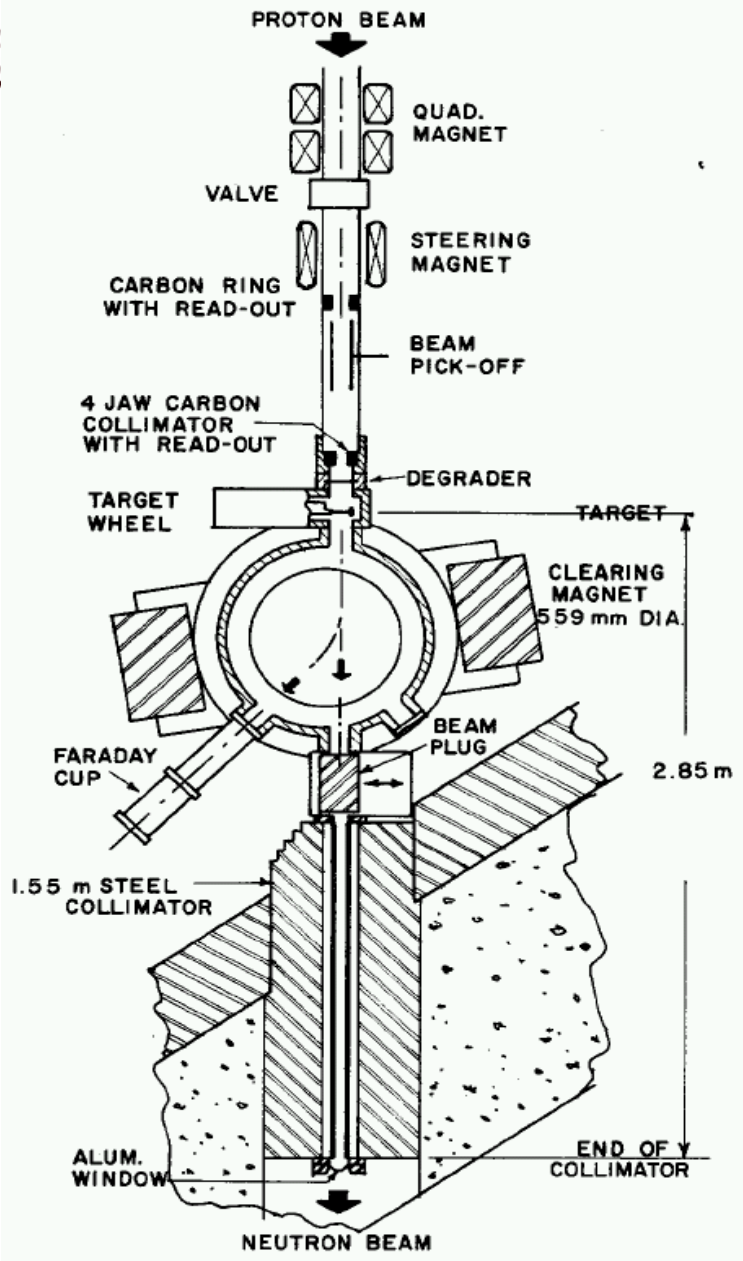


$d+p$ elastic @ RIKEN
 $E_d = 270$ MeV

資料：大強度高速中性子コースの開発 (CYRIC 岡村氏 (故) より)

UC Davis

Uppsala (new)



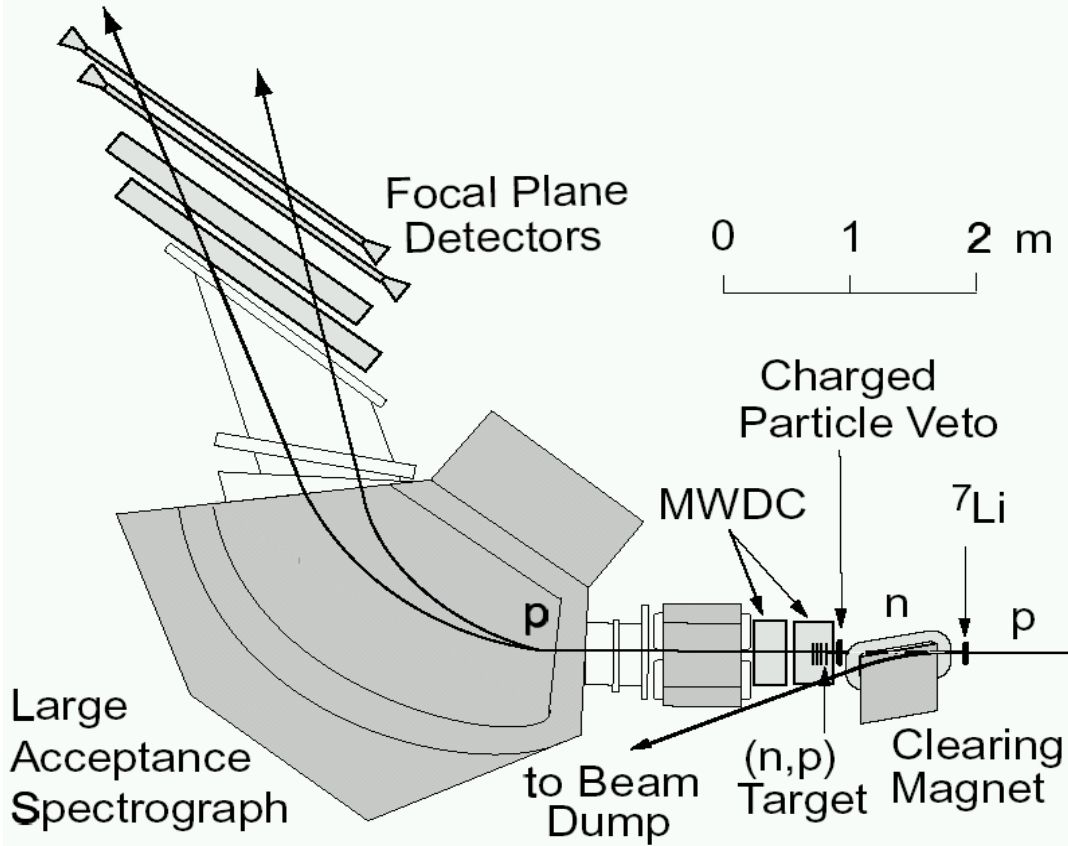


資料：大強度高速中性子コースの開発 (CYRIC 岡村氏 (故) より)

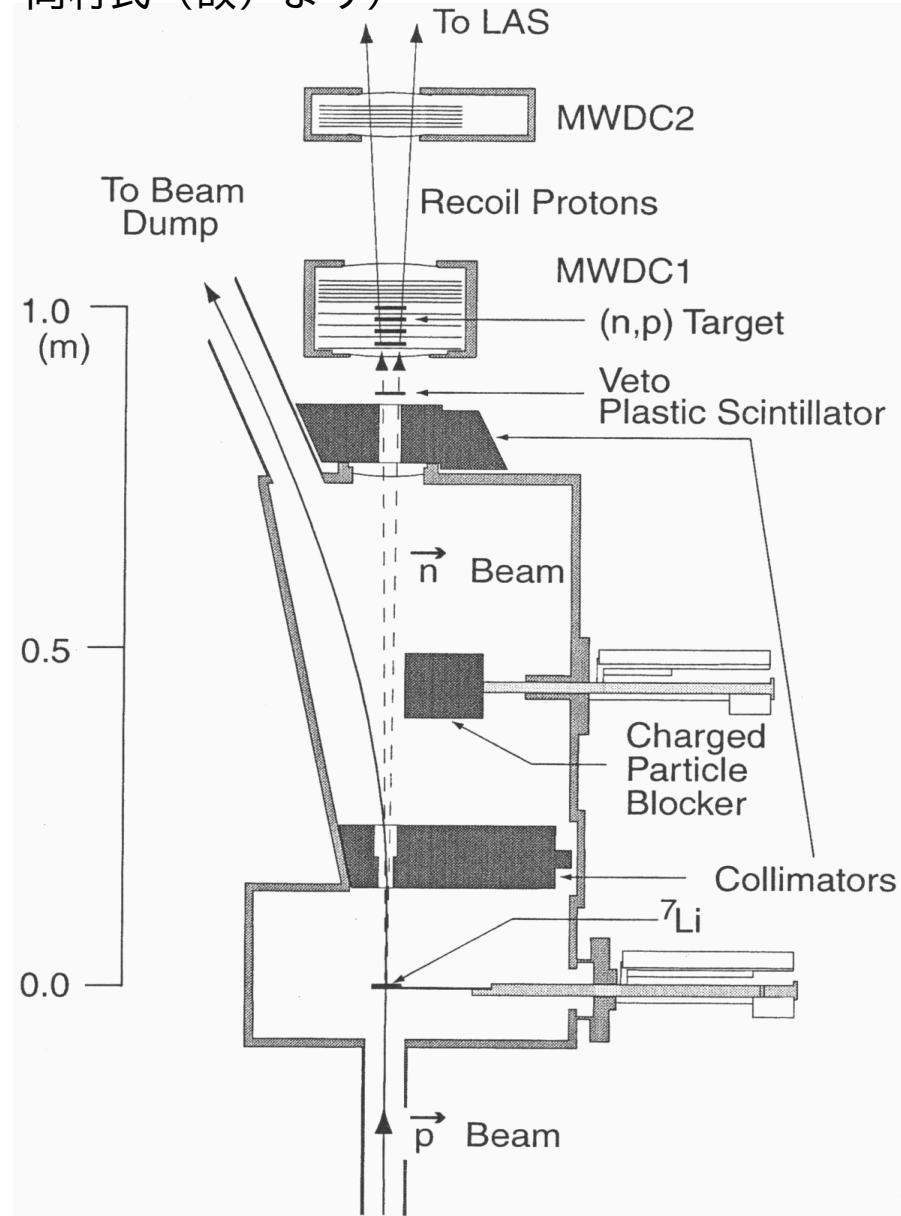
RCNP (n,p) facility

磁気スペクトログラフ

ターゲット+ワイヤ検出器 サンドイッチ
4面 (TRIUMFでは7面)



岡村氏 (故) より)



資料：大強度高速中性子コースの開発（CYRIC 岡村氏（故）より）



他施設との比較・CYRIC の仕様

${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応

準単色中性子ビーム

$d\sigma/d\Omega \approx 37 \text{ mb/sr} (> 70 \text{ MeV})$

タイプ1：厚いシールド・長距離

	Energy	ΔE	distance	flux ($n/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)	
Uppsala	25~180 MeV	1 MeV	3 m (8 m)	$3 \cdot 10^5$	2004 update
Louvain	65 MeV	2 MeV	3.3 m	10^6	10 μA
UC Davis	40~60 MeV	1 MeV	3 m	$6 \cdot 10^5$	10 μA

タイプ2：短距離・シールド無し（検出器重視）

	Energy	ΔE	distance	flux ($n/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)	
TRIUMF	200 MeV	0.7MeV	~ 1 m	10^5	0.3 μA
RCNP	300 MeV	1 MeV	~ 1 m	$3 \cdot 10^5$	0.5 μA

方針：短距離＋シールド（実験に応じて着脱）

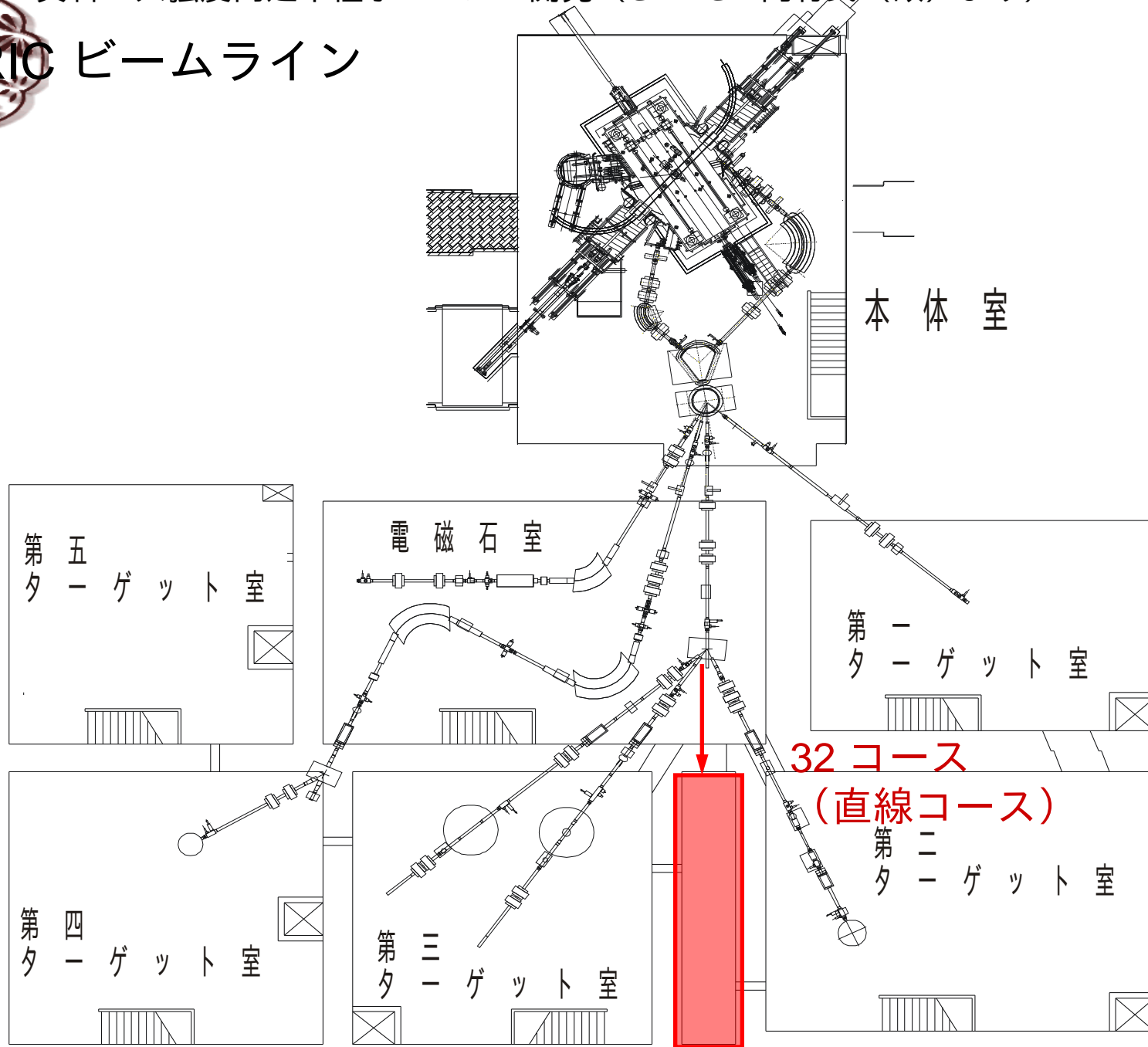
	Energy	ΔE	distance	flux ($n/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)	
CYRIC	20~90 MeV	1 MeV	0.7 m	$\sim 10^7$	



資料：大強度高速中性子コースの開発（CYRIC 岡村氏（故）より）



CYRIC ビームライン



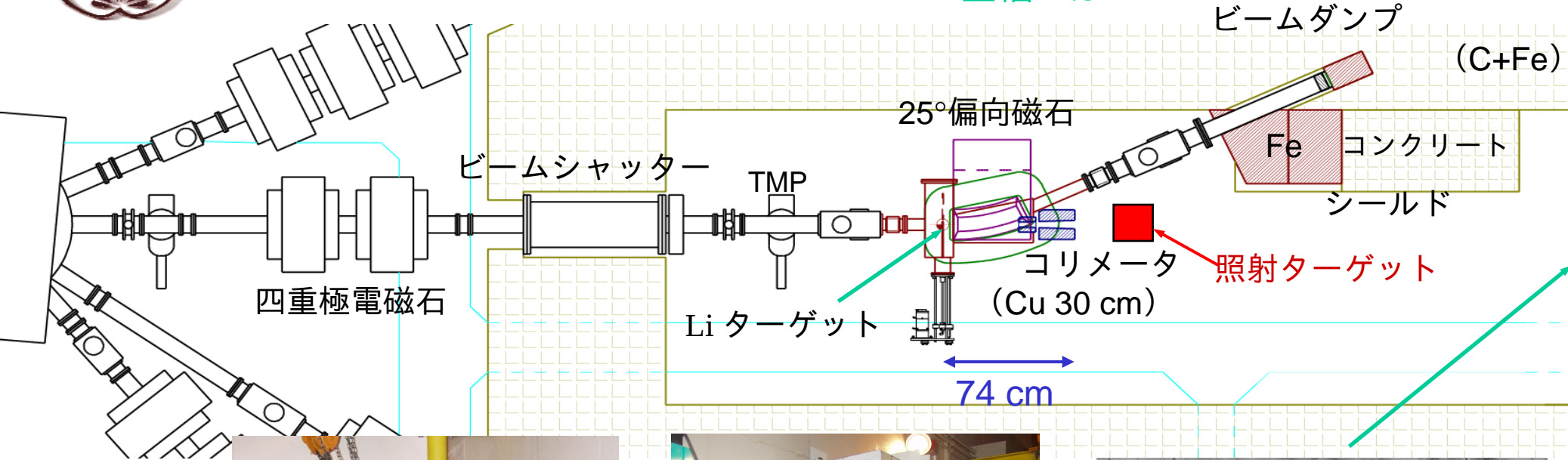
資料：大強度高速中性子コースの開発（CYRIC 岡村氏（故）より）

大強度高速中性子ビームコース（3 2 コース）



（将来のspin偏極ビームのために横向き偏向）

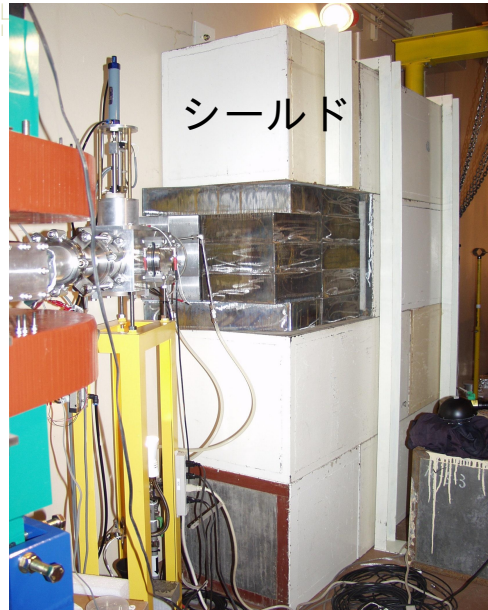
室幅 1.8 m



25°偏向磁石
1.5 T, $\rho = 93$ cm



シールド



壁コンクリート
1 m 増強



資料：大強度高速中性子コースの開発（CYRIC 岡村氏（故）より）



ビームテスト

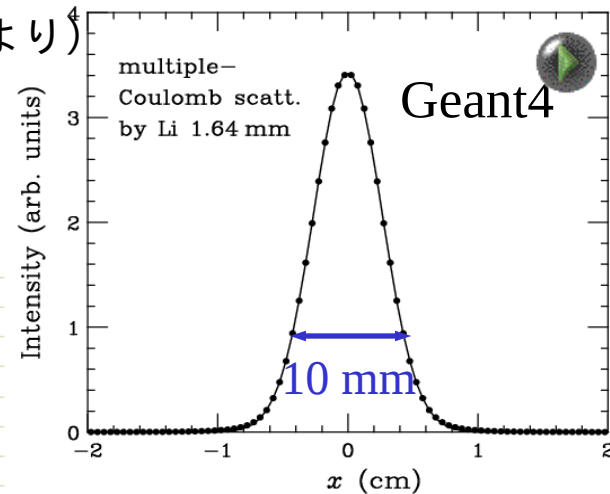
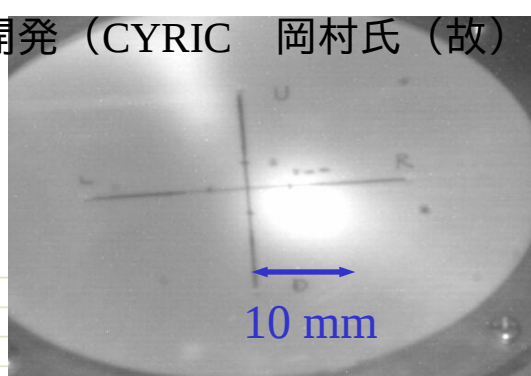
04/10/27-28

^{nat}Li 1.64 mm^t

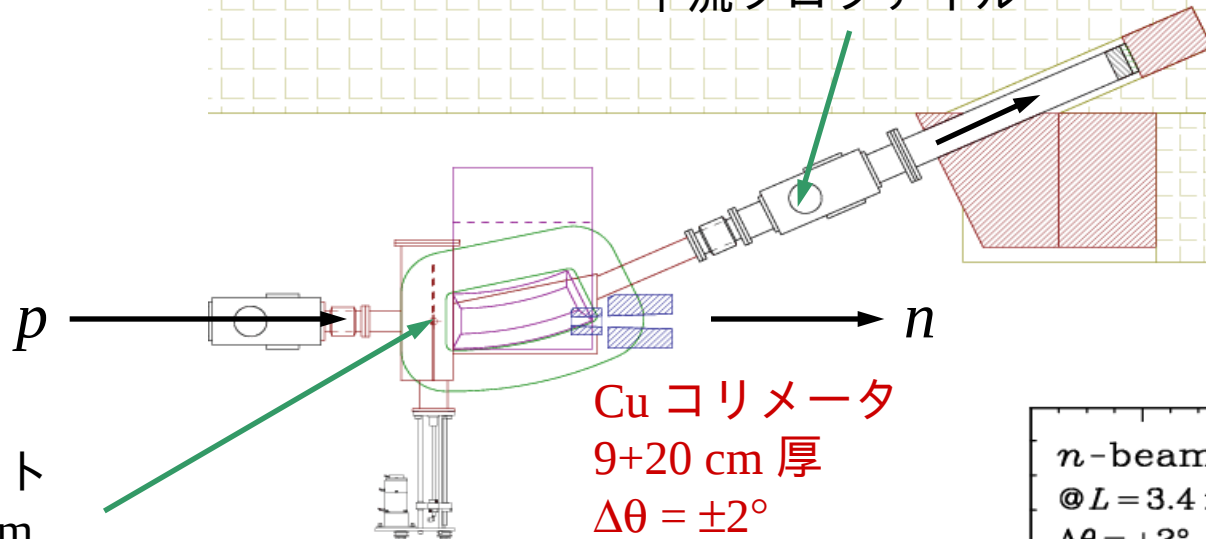
$E_p = 70$ MeV

$\Delta E = 0.7$ MeV

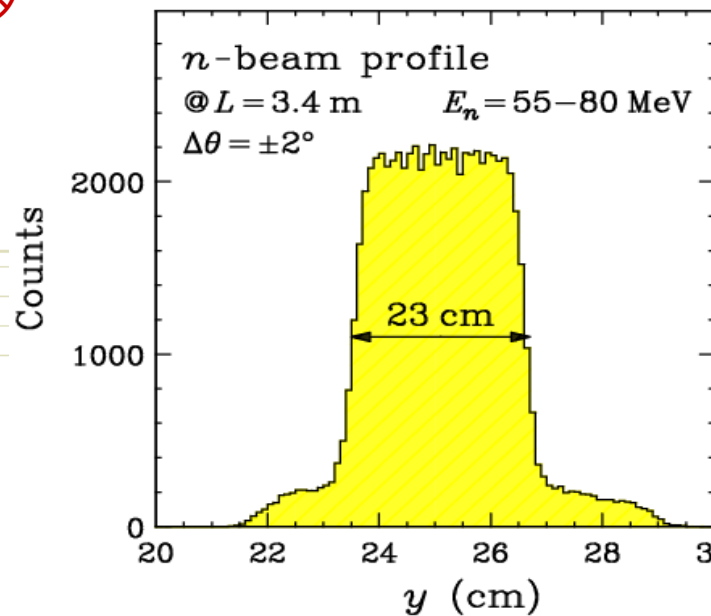
$I_p = 1$ μA



下流プロファイル



$L = 3.4$ m



多様な量子ビームにより展開される研究

● 核物理・基礎物理：

大強度陽子・重イオンビーム： 不安定核構造、元素合成、基本対称性….

● ライフサイエンス： 医工学研究

高品質陽子ビーム： 粒子線治療基礎研究….

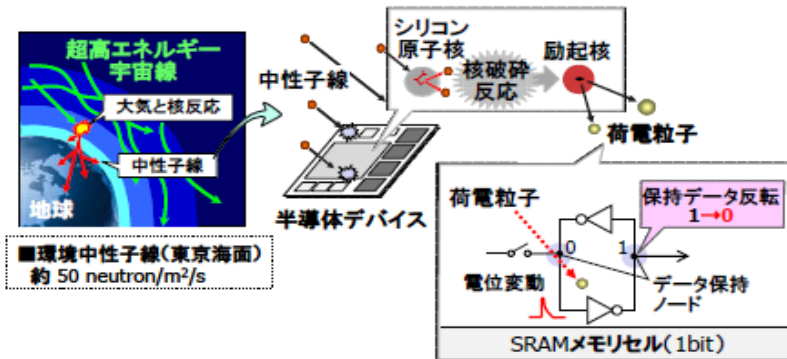
● 測定器開発・宇宙環境下における電子機器動作特性： KEK、JAXA、無人宇宙….

陽子・イオンビーム： 各種検出器・制御デバイス等の放射線耐性の評価

● 産学共同研究： 日立、エルピーダメモリ、フジクラ….

大強度中性子ビーム： 半導体集積回路ソフトエラー評価、高温超電導線材の放射線耐性

■ 中性子ソフトエラーの発生メカニズム



■ LSIの微細化・低消費電力化によりソフトエラーの発生頻度増加

- ✓ メモリデバイス(SRAM/DRAM)はマルチビットエラーの増大
- ✓ ロジック回路におけるソフトエラーの増大(FF, クロック, リセット)

→ 社会インフラを支える電子システムの信頼性に影響大



システム装置における中性子線ソフトエラーの評価が重要

原子核・素粒子・宇宙領域外部ユーザーのサイクロ利用状況

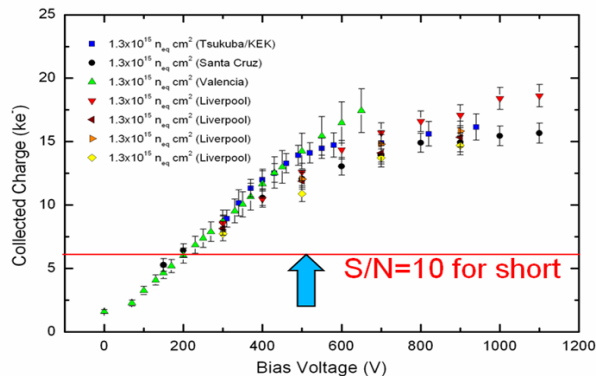
大強度陽子ビーム

ATLAS実験用シリコン半導体
検出器放射線損傷実験

→ 2~3回/年

- ・ KEK, 筑波大学G
- ・ Academia Sinica (台湾G)

$1.3 \times 10^{15} n_{eq} cm^{-2}$
70 MeV Proton



重イオンビーム

衛星搭載用制御機器、
センサーの放射線損傷試験

→ 2~3回/年

- ・ JAXA
- ・ 九大G等

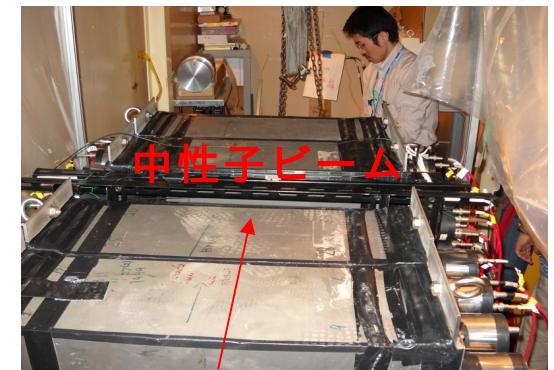
大強度中性子ビーム

J-PARK中性K中間子
ビームライン用n/γモニター
検出器Cerberusの中性子に
対する応答測定

→ 1~2回/年

- ・ 山形大, 佐賀大, KEK

CYRIC AVFサイクロトロン



CYRIC実験セットアップ

SLHC用高放射線耐性シリコン検出器の開発

ATLAS実験用シリコン半導体位置検出器の放射線損傷試験」（課題番号9136）

KEK、筑波大学、CYRIC(篠塚氏)

SLHC（LHC次期計画）では、 $10^{15}/\text{cm}^2$ に達する放射線量が予想される。
型反転しないP型バルクセンサーを用いたマイクロストリップ型を開発中。
年2回の照射を通して、センサー設計を確認。

学生の教育：

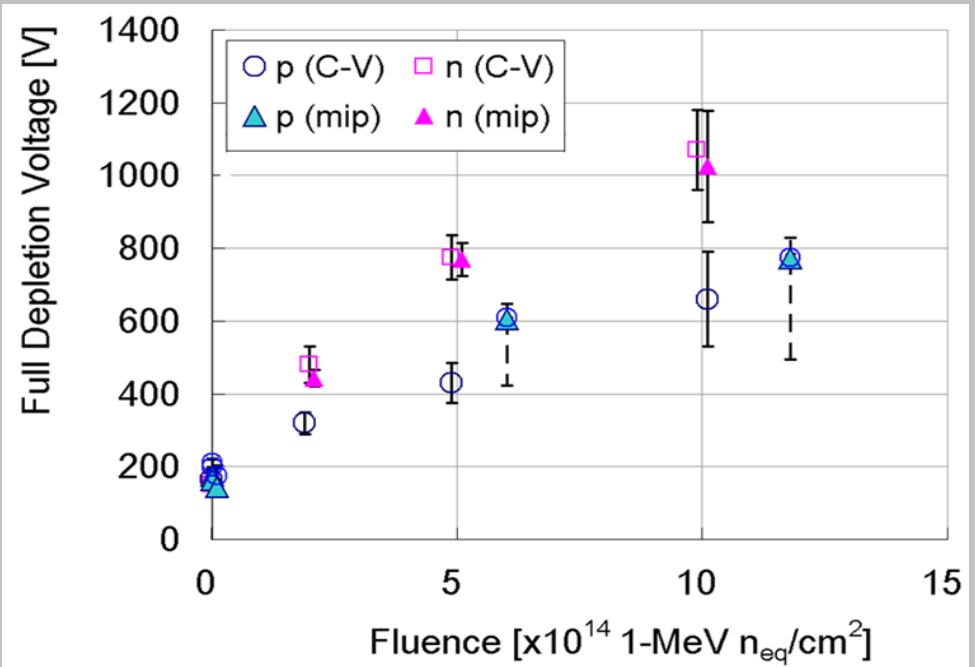
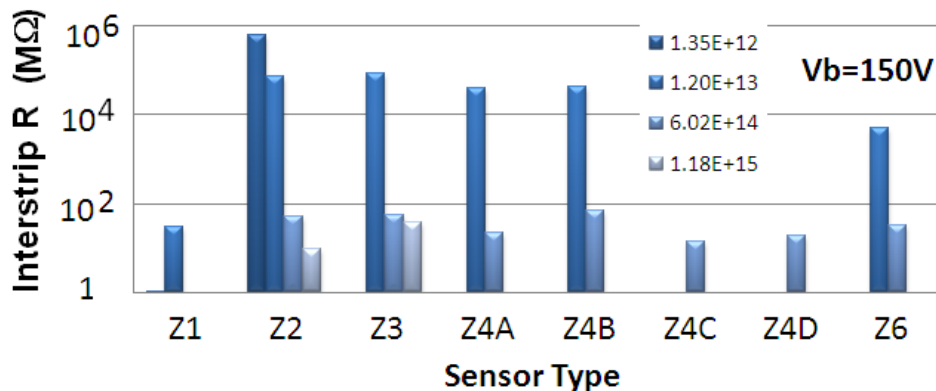
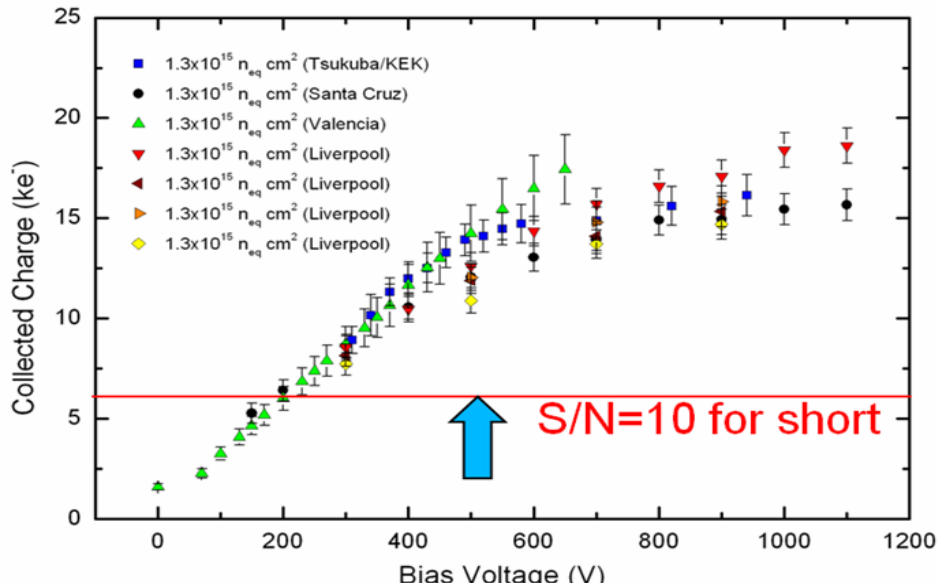
筑波大学では修士の学生を中心に照射実験に参加している（年2回平均で、21年度は3＋4名の学生が参加、スタッフは1名）。単にセンサー性能評価の測定に限らず、実際の照射の様子を体験することは研究の全容を把握するために大変に有用である。また、加速器の知識や放射線防御の実態を体験できる。

照射施設：

この研究は海外のグループと共同で行い、CYRICで照射したサンプルの一部は海外の研究所・大学に渡されている。海外で比較的に利用しやすい施設としてKarlsruheの加速器があるが、日本グループは照射の利便性と主導性を保つためにCYRICを推進している。

SLHC用高放射線耐性シリコン検出器の開発

**$1.3 \times 10^{15} n_{eq} cm^{-2}$
70 MeV Proton**



(左上) $10^{15}/cm^2$ でも、500Vのバイアスをかけられ

ば十分なS/N \sim 20が期待できる。

(右上) 陽子、中性子による全空乏化電圧。

$10^{15}/cm^2$ では700 \sim 1000Vに達する。

(左) 電極間抵抗は、照射後も10MΩあり、十分に高い。



山形大・佐賀大実験グループ

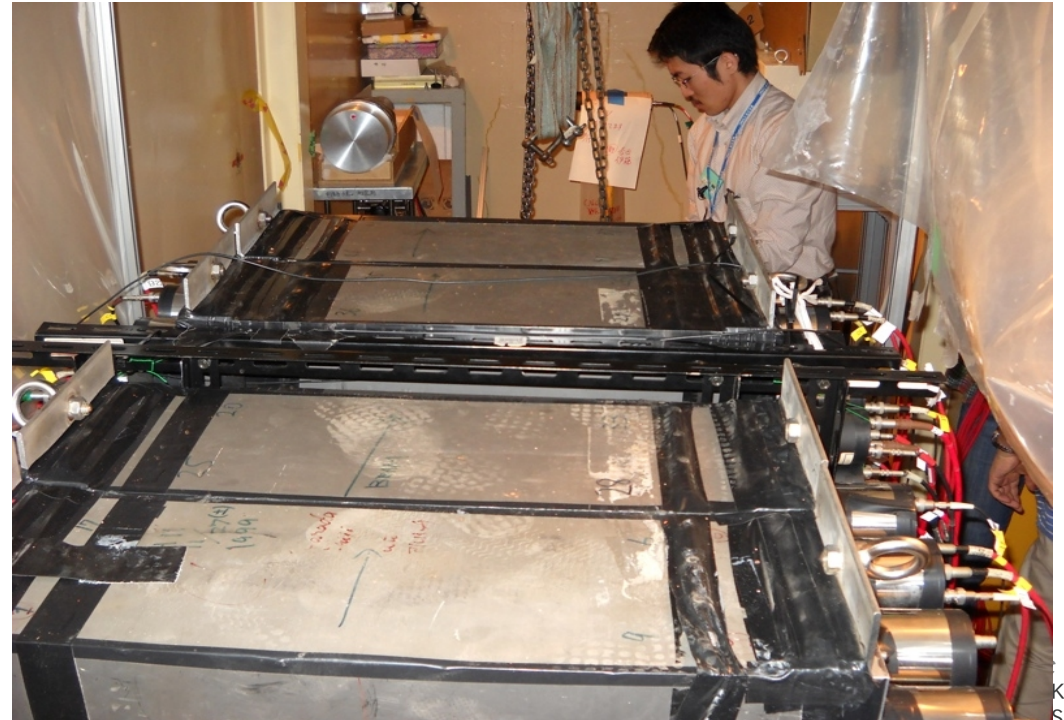
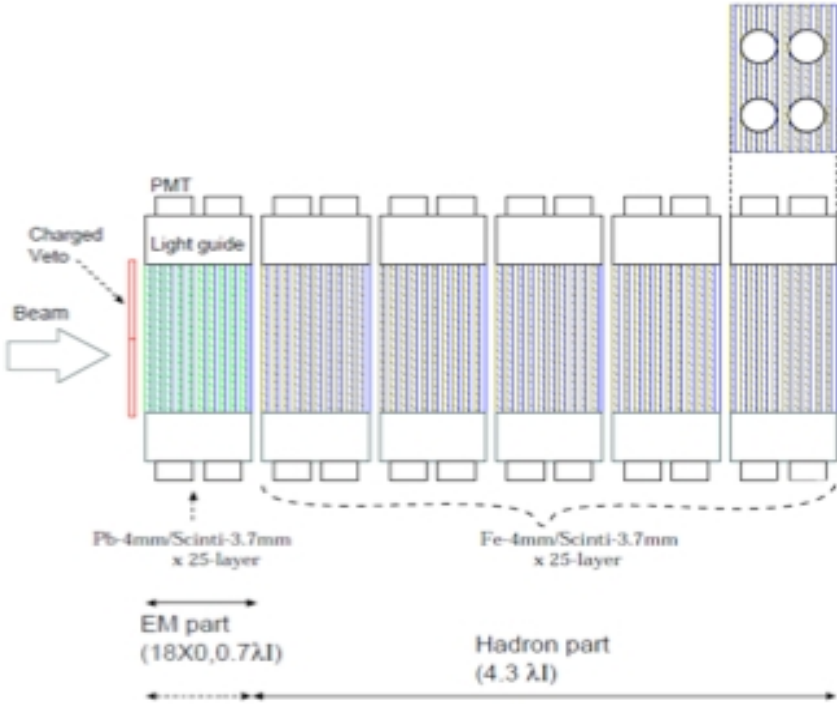
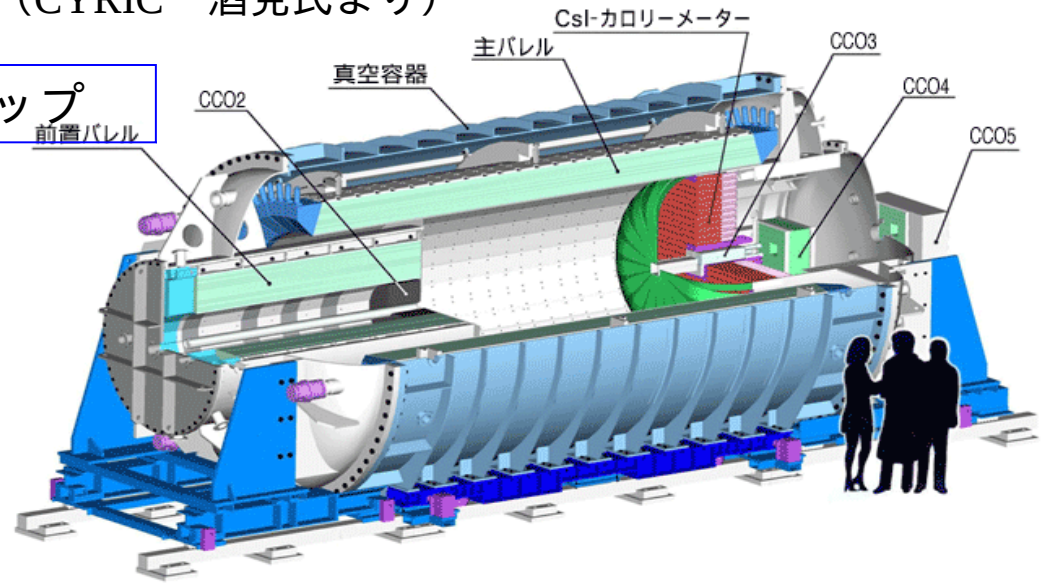
J-PARC中性K中間子ビームライン用
n/γモニター検出器Cerberusの中性子に対する応答の測定
(2009年6月15-18日)

- * E14 KOTO実験のビームラインの性能を測定するために制作されたn/γモニター用サンドイッチカロリメータCerberusの中性子に対する応答をCYRICの準単色中性子線を用いて測定。実際のJ-PARC中性K中間子ビームラインでの測定の基礎データを得た。
- * E14 KOTO実験「中性K中間子稀崩壊実験」
 - * 実験責任者: 大阪大学 山中卓
 - * Direct CP violation反応である $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊を 8×10^{-12} の感度(SM prediction: 2.8×10^{-11})で測定する。
- * CYRICで実験を行なう意義
 - * CYRICの中性子照射ラインでの実験はtaggingされた準単色の中性子が得られるため、中性子検出器の性能が直接評価可能
- * 実験参加者
 - * 山形大学(スタッフ3名、修士1名、学部生4名)、佐賀大学(スタッフ1名、博士1名、修士3名)、KEK(スタッフ1名)
- * 解析状況
 - * 山形大学学部4年生が卒業論文として解析中。
 - * 10月から J-PARC KL Beam line のbeam survey開始
 - * Cerberusをbeam lineに設置し、core n/γの測定を行い現在解析中



山形大・佐賀大G実験セットアップ

前置バレル



中性子ビーム照射コース



144ch HAPD の中性子照射試験

144ch HAPD

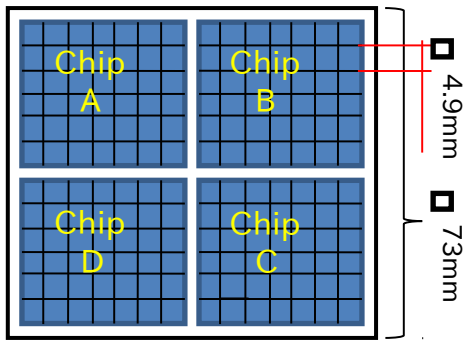
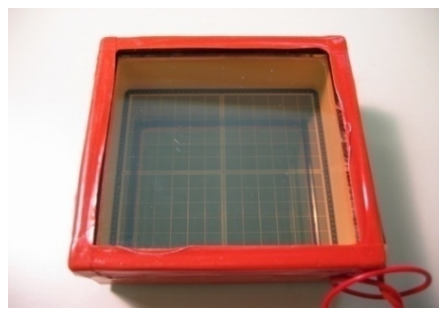
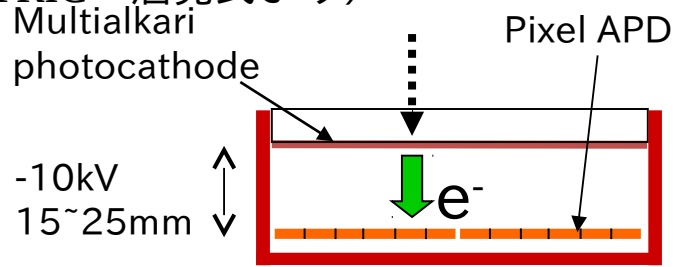
- Super-KEKB/Belle II 実験のエアロジェルRICH 検出器用光センサーとして、浜松ホトニクス社と新規共同開発。
- 磁場中でシングルフォトンの位置検出可能。

中性子照射試験

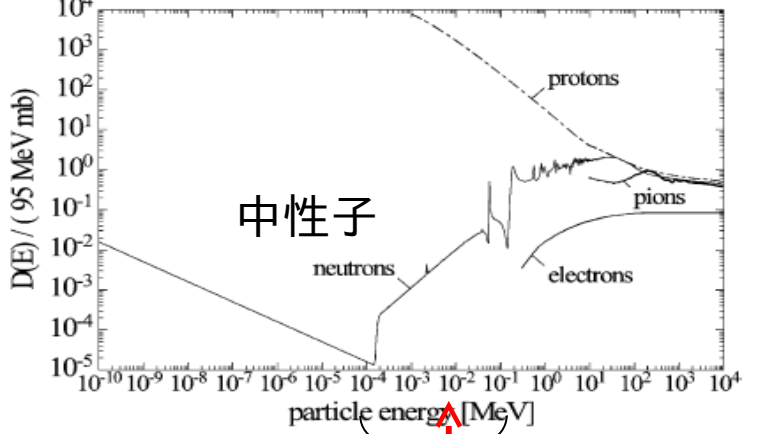
- Super-KEKB/Belle II 実験で予想される中性子線量 $10^{11-12}/\text{cm}^2/\text{year}$, O(MeV)
- CYLIC の中性子フラックス $10^6/\text{cm}^2/\text{s}$
→ O($10^{11}/\text{cm}^2/\text{s}$) までの耐性を数日間で検証可能 (他所では数十日必要)。
- CYLIC では O(10MeV) での耐性を試験
弥生原子炉では $<1\text{MeV}$

参加研究機関

- 名古屋大、首都大、東邦大、千葉大学、KEK、ヨゼフ・ステファン研究所 (スロベニア)
- 3-4名のスタッフと、各大学より1-2名、計5名程度の修士大学院生が参加予定



シリコン半導体の放射線損傷係数



弥生原子炉で試験

CYLICで試験

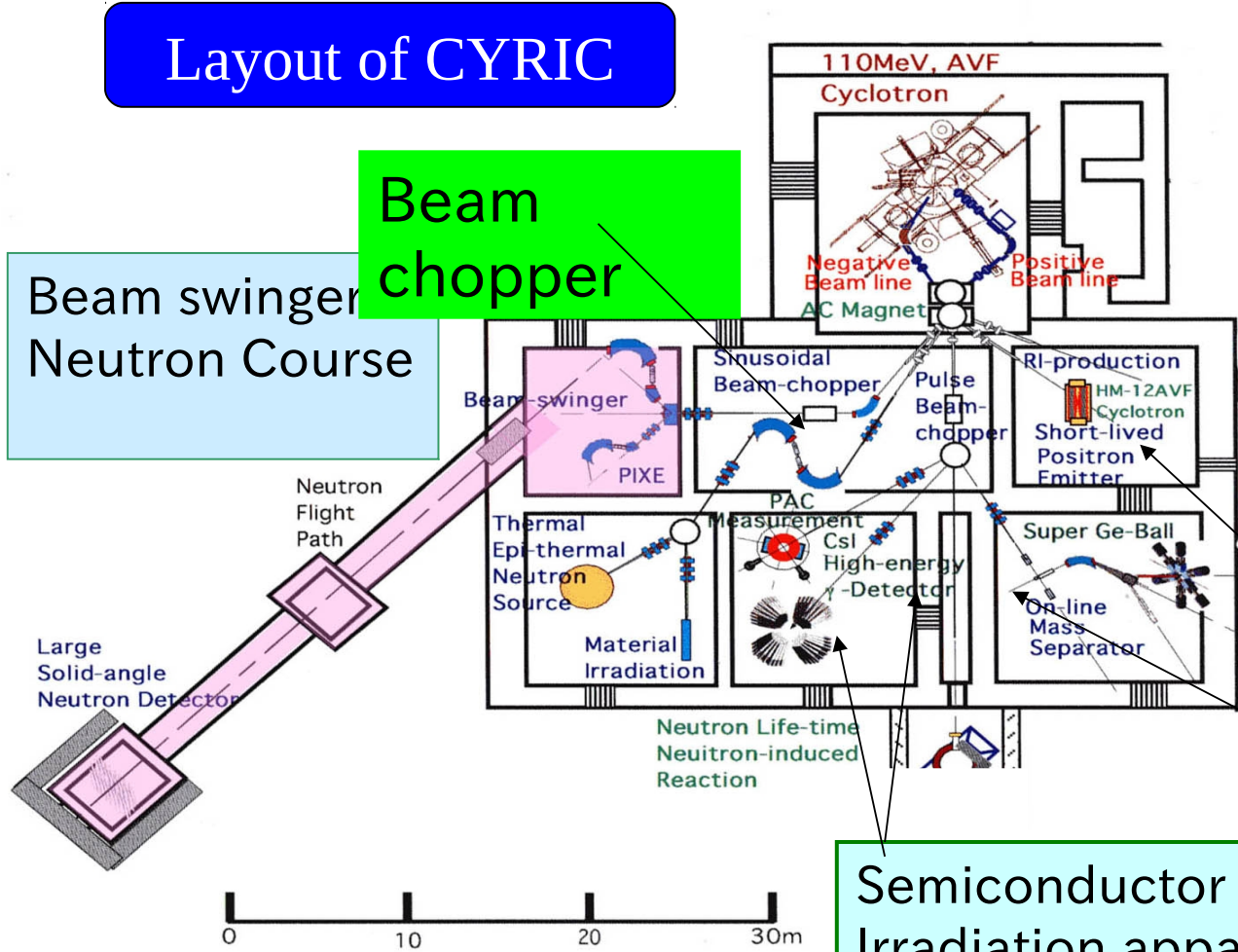
22年度末に運転停止予定



Cyclotron & Radioisotope Center, Tohoku University (CYRIC)



Layout of CYRIC



Performance of K=110 AVF cyclotron

Protons	10-90 MeV
• Deuterons	10-65 MeV
• ³ He	20-170 MeV
• ⁴ He	20-130 MeV

- Heavy Ions
- Beam Chopper etc.

Automated-irradiation apparatus

Online-mass separator

Semiconductor Irradiation apparatus

東日本大震災における CYRIC 加速器施設の被害と復旧状況

CYRICマシニンググループ： 篠塚勉、酒見泰寛、涌井崇志、伊藤正俊
島田健司、吉田英智

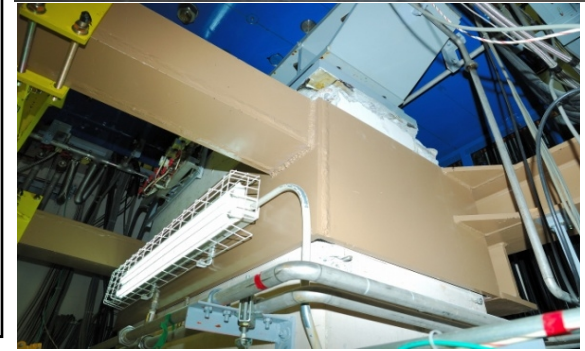
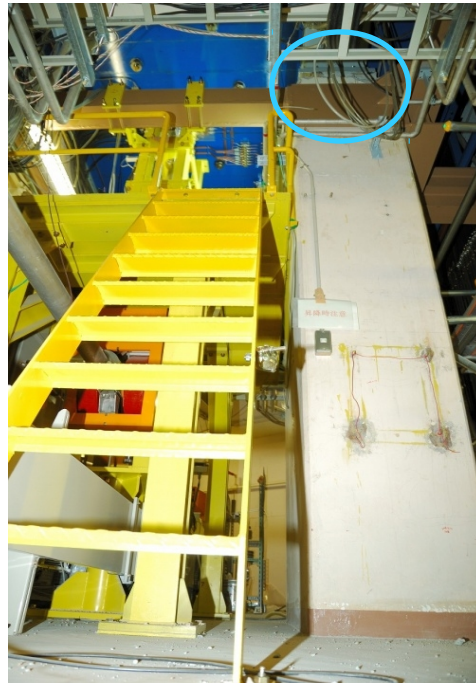
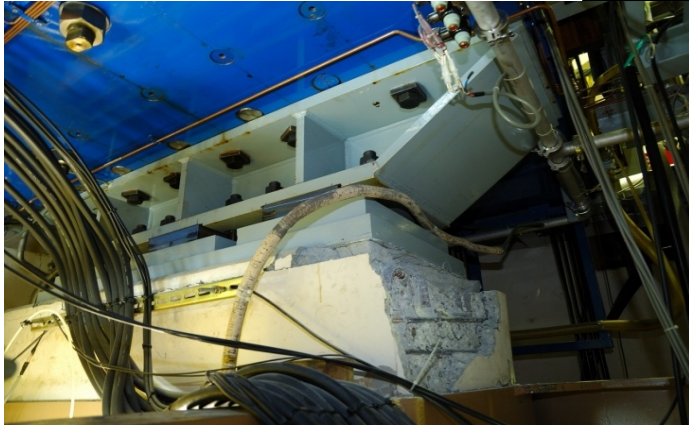
住重加速器サービス： 大宮康明、高橋直人、高橋研、鈴木淳
(CYRIC常駐)

- 加速器施設の被災状況
- 930型サイクロトロンへの復旧作業
- シールド扉の復旧作業 (建屋内)
- シールド扉の復旧作業 (建屋外)
- HM12型サイクロトロンへの復旧作業
- 地震発生後の経過まとめ

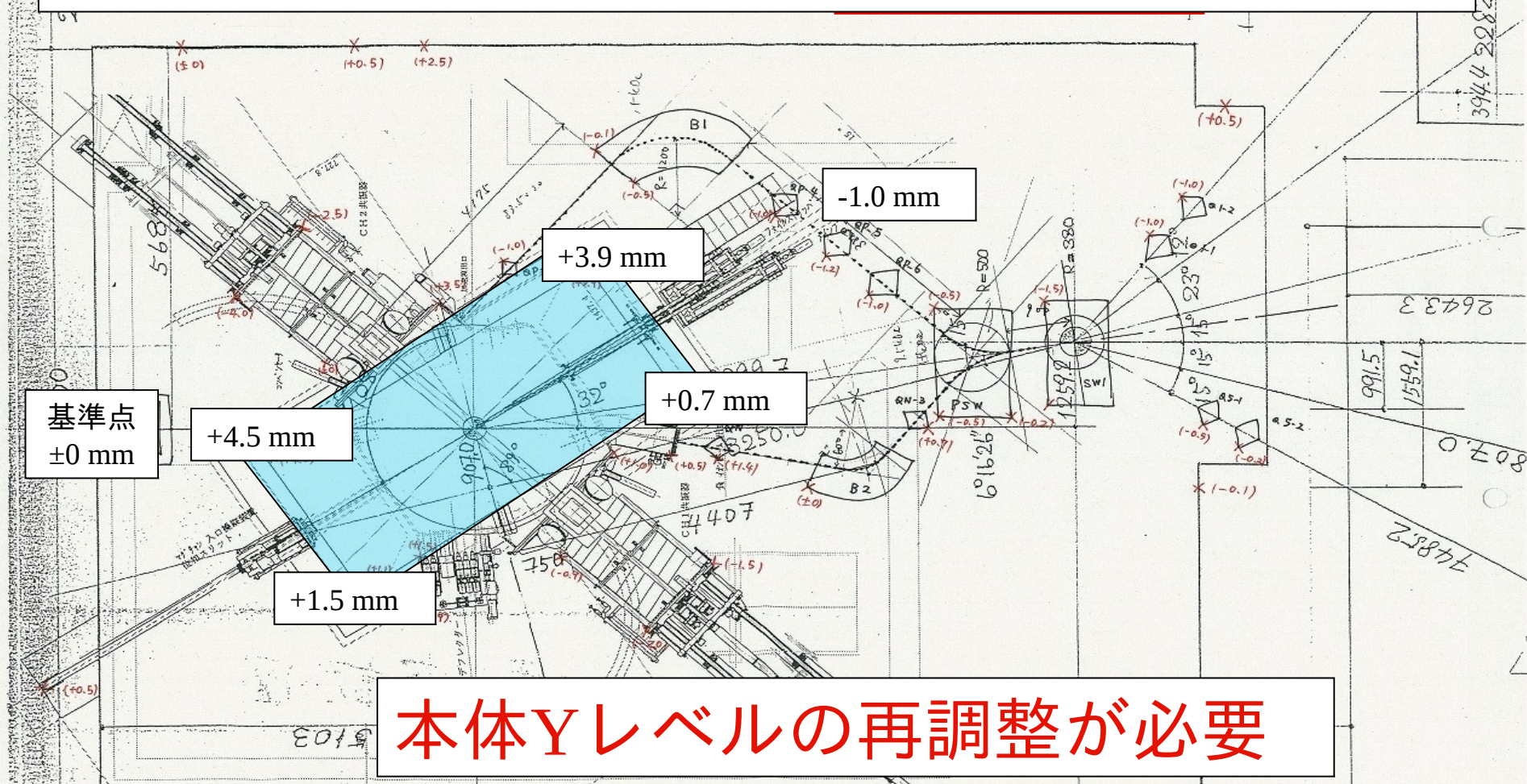
大型サイクロ被災状況(1)

大型サイクロトロンの変状

- ・ 200tの加速器を太さ1.7x0.8m、高さ4mの2本の鉄筋コンクリート製支柱で支持
- ・ 支柱上部の加速器支持台付け根が損傷
- ・ 加速器本体が3~4mm傾いている



支柱の損傷によりサイクロ本体が傾いた



本体Yレベルの再調整が必要

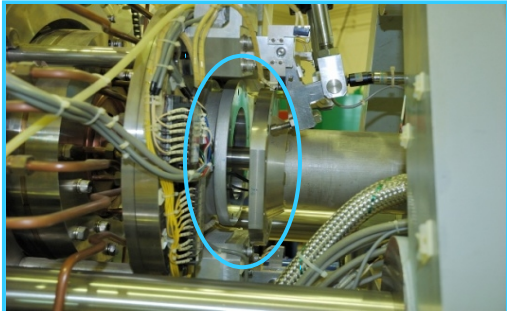
(サイクロヨークの長軸は4 m。1 mmの差は40 m先のBT末端では10 mm。)

大型サイクロ被災状況(2)

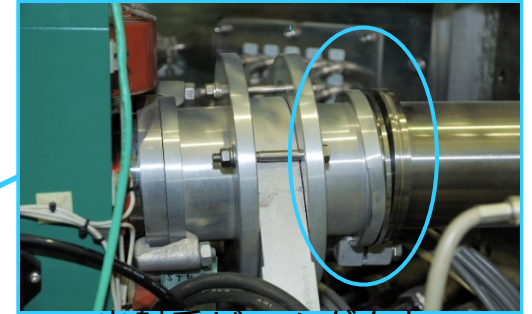
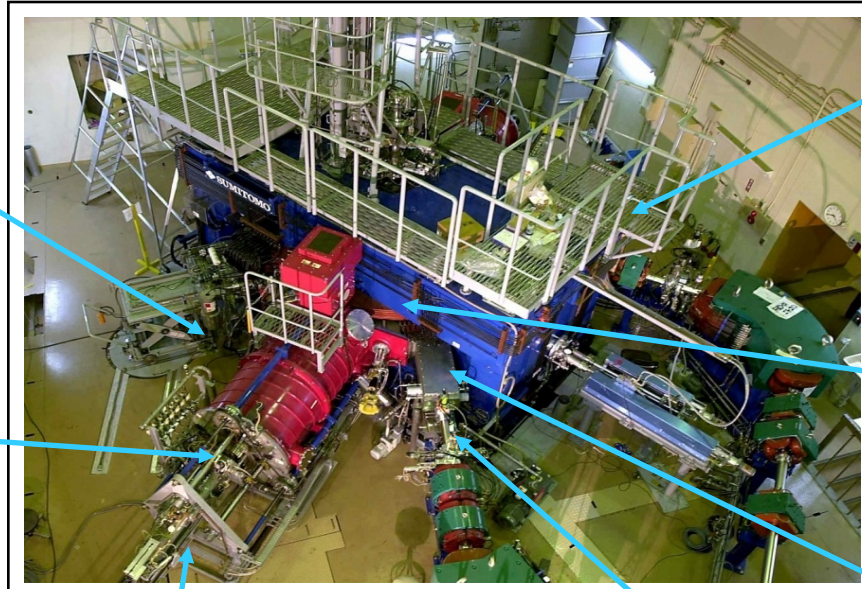
930型サイクロトン本体



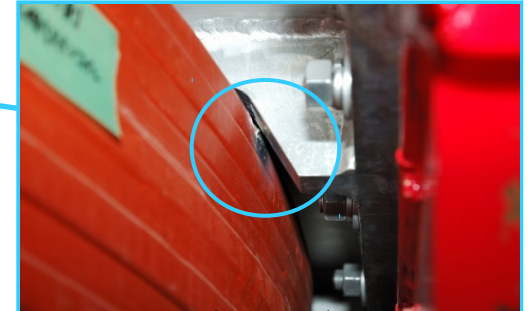
デフレクタ支持台付け根の床



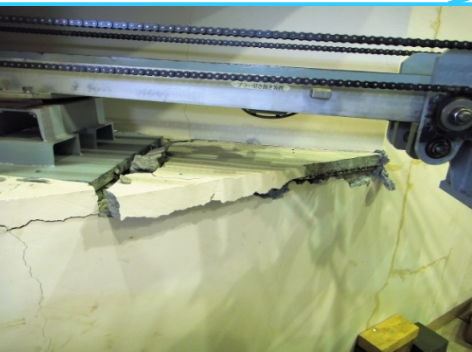
プラー引抜装置真空接続部



出射系ビームダクト



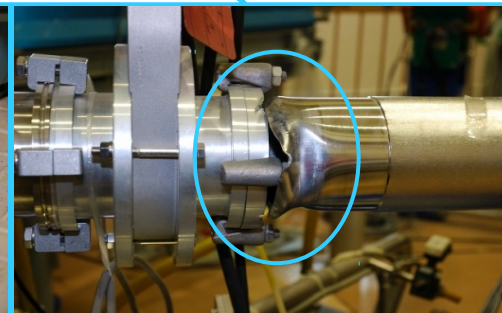
メインコイル



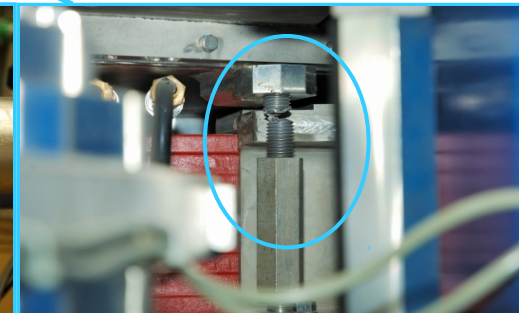
プラー引抜装置支持台



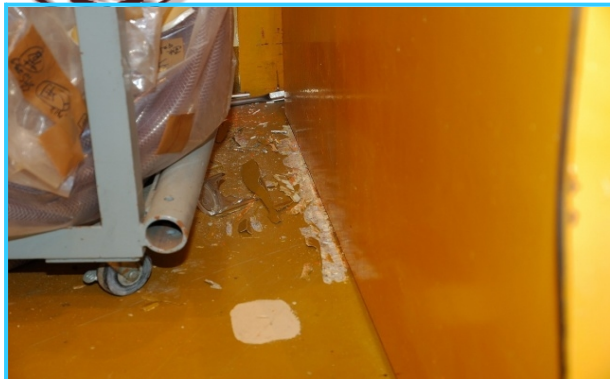
RFショート板用レール



出射系ビームダクト



出射ライン真空槽支持ボルト

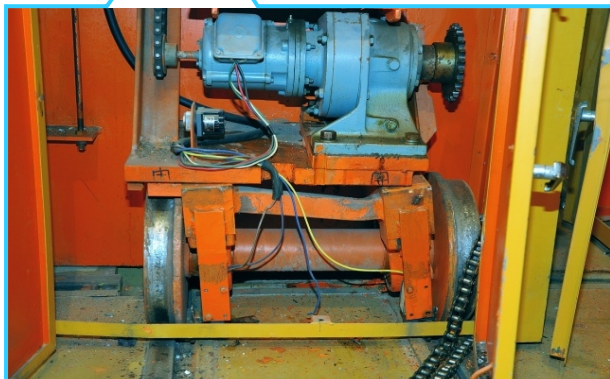


各実験室のシールド扉

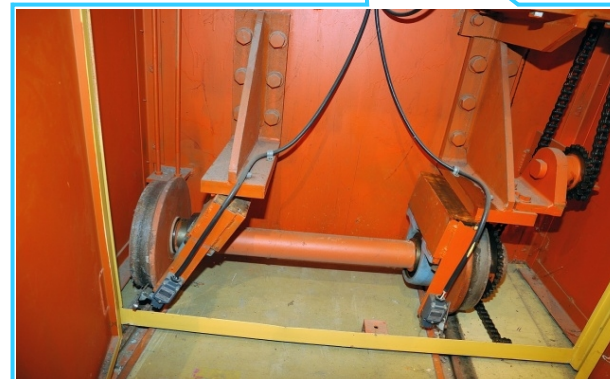
2ヶ所のシールド扉で駆動機構が破損、シールド本体が横ズレし、床を損傷。他9ヶ所シールド扉でも駆動用チェーン破断や扉の傾斜による開閉不能。



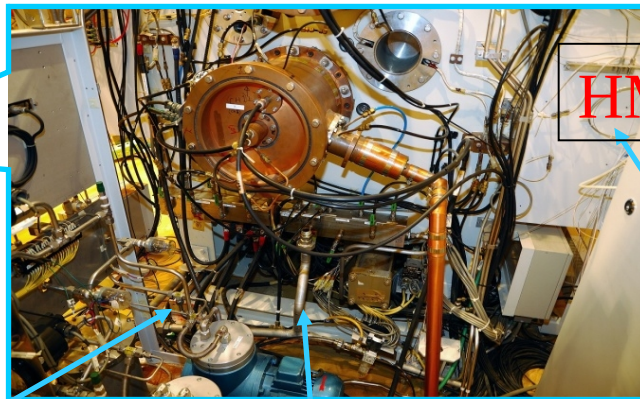
駆動用チェーンの破断



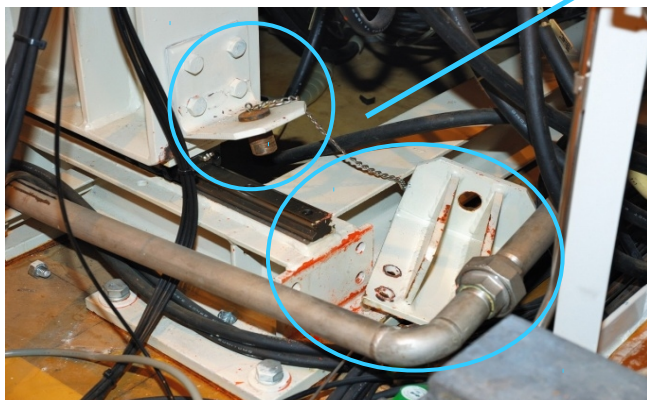
扉の傾斜により閉まらない



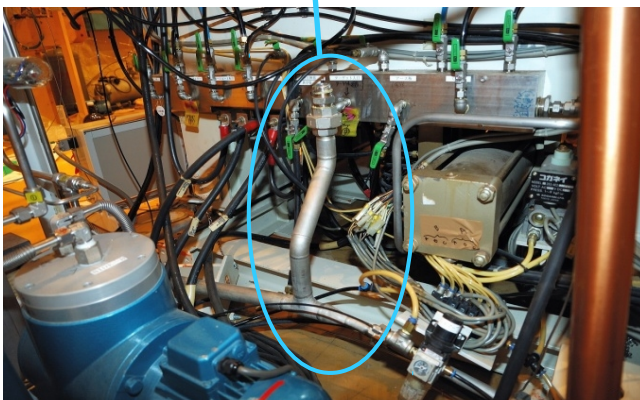
HM12型サイクロトロン被災状況



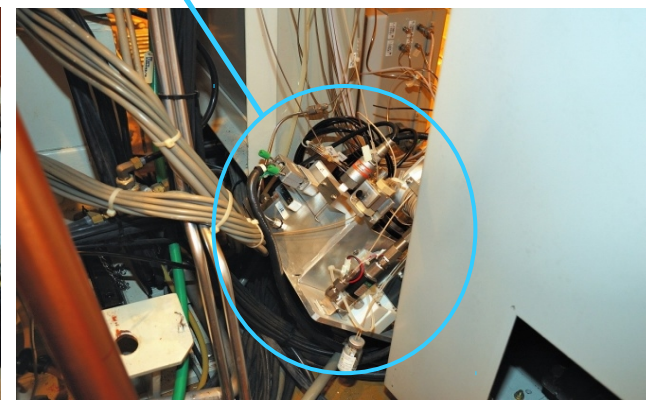
HM12型サイクロトロン本体



本体固定具



冷却水配管抜け・変形



^{18}F 水供給装置脱落

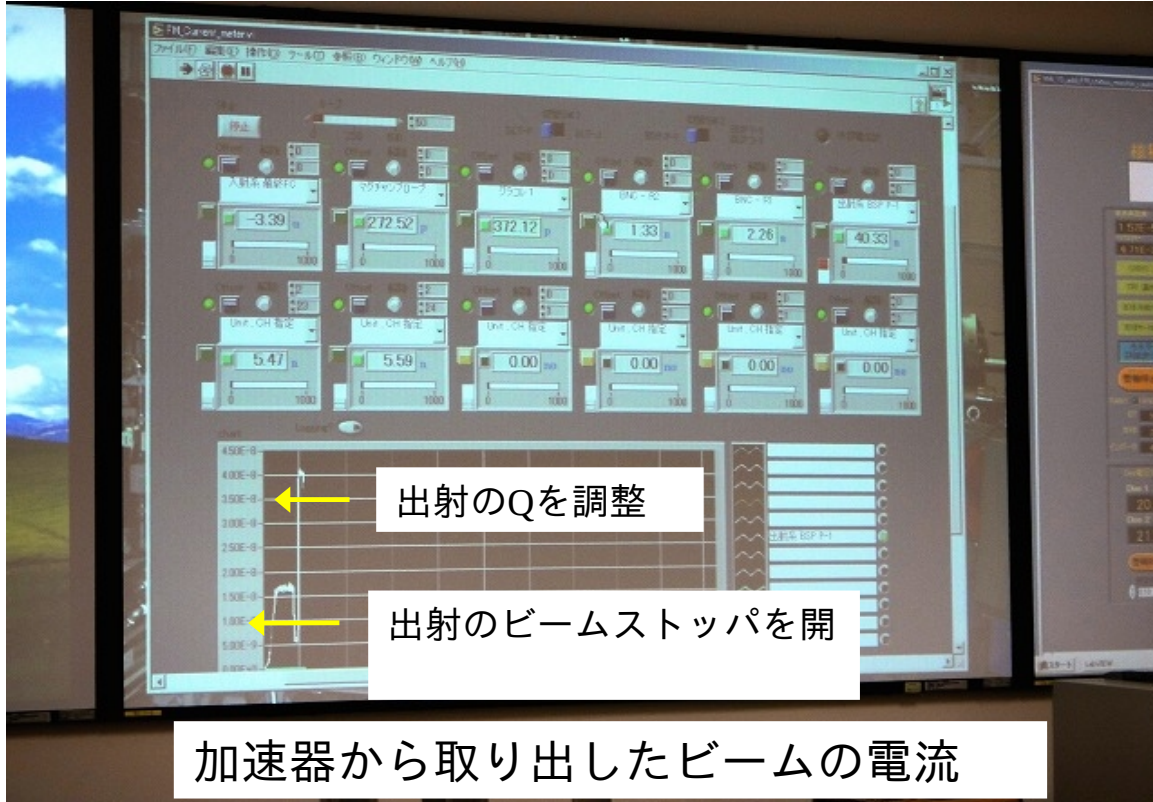
サイクロの被災状況－概要まとめ－

- サイクロ建屋
 - クラック多数(建屋強度に問題なし)
- 加速器(AVF)本体
 - 加速器支柱が損傷
 - 支柱損傷に伴い、加速器本体のYレベルがズレ、調整が必要
 - メインコイルが部分的に損傷
 - 加速器構成部品やその支持部の破損
- 加速器(HM12)本体
 - 本体固定機構損傷
 - ¹⁸F用水充填装置が脱落・破損
 - 冷却水マニホールドより配管が脱落・変形し破損
- イオン源(3台)
 - 真空ポンプ破損
- 入射系・出射系・ビーム輸送系ビームライン
 - ビームダクト破損 7ヶ所
 - 偏向電磁石の位置ずれ 少なくとも2台
 - 電磁石破損 10台(四極 7台、偏向 3台)
 - バルブ類破損 4台
 - ビーム軸のアライメントは加速器位置再調整等に伴い、全て調整が必要
- 各ターゲット室
 - シールドブロックのずれ 10ヶ所程度
- シールド扉
 - 駆動機構破損 4台
 - レールや扉の傾き 7台

震災以来の加速試験

2012年7月3日

震災以来1年4か月ぶりに加速に成功



陽子 30 MeV



資料：参考文献

BNCT 関連

- 1) INSTALLATION AND APPLICATION OF AN INTENSE ${}^7\text{Li}(p,n)$ NEUTRON SOURCE FOR 20–90 MeV REGION
M. Baba et al.
Radiation Protection Dosimetry (2007), Vol. 126, No. 1–4, pp. 13–17
- 2) Extension of Spallation-Based BNCT Concept to Medium- to High-Energy Accelerators
S. YONAI et al.
Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 45, No. 5, p. 378–383 (2008)

サイクロ更新、負イオン加速関連

- 1) Present status of the K=110 MeV AVF cyclotron at Tohoku University
M. Fujita et al. Proceedings of The 17th International Conference on Cyclotrons and Their Applications 2004 , 143-145 Tokyo
- 2) H- Acceleration with AVF 930 cyclotron
T. Endo et al. Proceedings of The 17th International Conference on Cyclotrons and Their Applications 2004 , 146-147, Tokyo
- 3) Design of an all-permanent-magnet ECR ion source at the Cyclotron and Radioisotope Center
Yamazaki et al. Review of Scientific Instruments 73(2) (2002) 589-591
- 4) Damage by the Great East Japan Earthquake and Current Status of the Sendai Cyclotron
T. Wakui et al. J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 9, No. 2, 2012