

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 developments and applications of
accelerator system at the WERC

羽鳥 聡、栗田哲郎、林豊、山田裕章、
高城啓一、久米恭、安田啓介、石神龍哉、辻宏和
若狭湾エネルギー研究センター

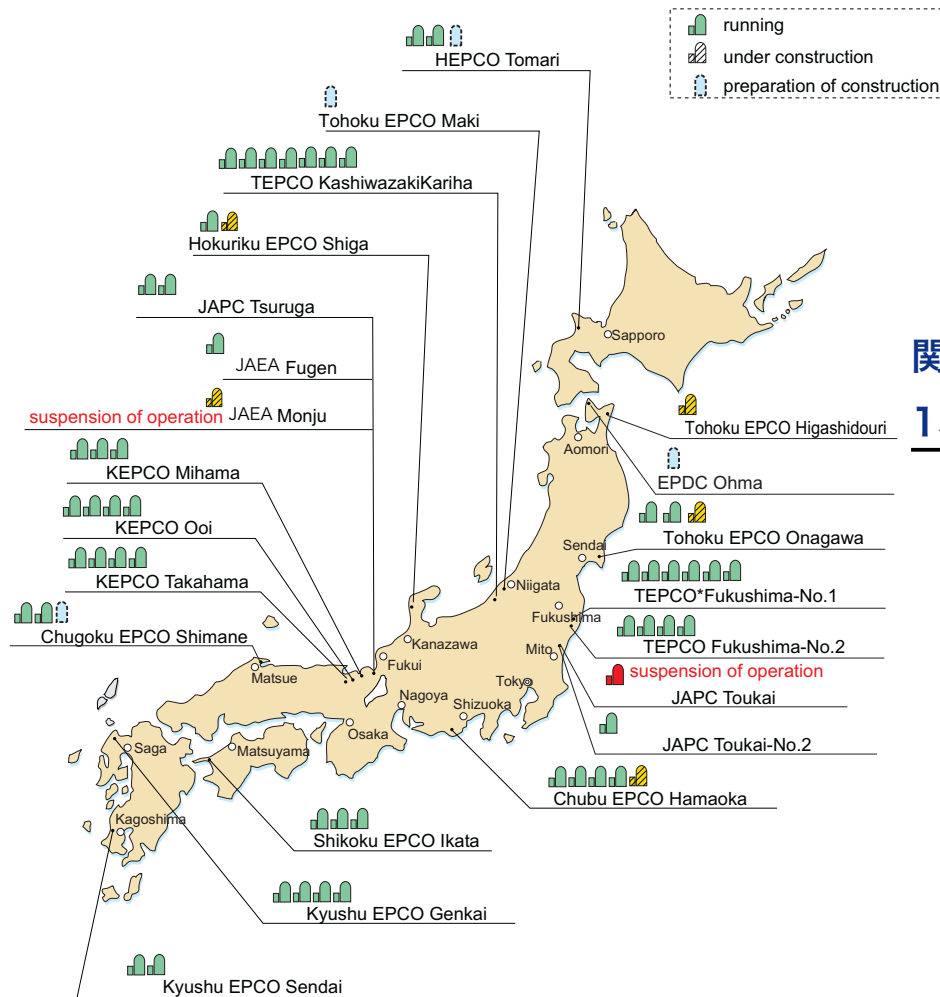
目次

1. エネ研、WERC（若狭湾エネルギー研究センター）
とは。
2. エネ研加速器施設概要
3. タンデム加速器とビームライン、実験
4. シンクロトロンとビームライン、実験
5. まとめ。

1. 若狭湾エネルギー研究センター

The Wakasa Wan Energy Research Center とは？

Location of WERC



JAEA もんじゅ
関西電力美浜発電所
1、2、3号機

日本原電敦賀発電所
1、2号機

JAEA ふげん
(原子炉廃止措置
研究開発センター)

関西電力高浜発電所
1、2、3、4号機

関西電力大飯発電所
1、2、3、4号機

設立経緯

1981 アトムポリス構想

『原子力発電所の集中立地の特徴を活かし、エネルギー関連技術や地域産業への応用技術の研究、研修等を実施するための施設を整備する』

1987 第13期日本学術会議勧告『地域型研究機関構想』

1993 財団法人若狭湾エネルギー研究センター発足

科学技術庁、通商産業省許可

1998 福井県若狭湾エネルギー研究センター開所

加速器施設建設開始

2000 加速器施設運用開始

2002 がん治療装置治験開始

2003 がん治療臨床研究開始

2009 福井県立病院に臨床研究成果移転（福井県陽子線治療センター）

WERC の目的のひとつ

イオンビームの物質、材料科学、生物科学、医療
への応用

イオンビーム分析手法の開発

材料照射・耐放射線性能評価

生物照射・イオンビーム育種、突然変異機構解明

医療照射技術開発・臨床照射

2. WERC 加速器施設

ターゲット表面から内部まで大強度ビーム

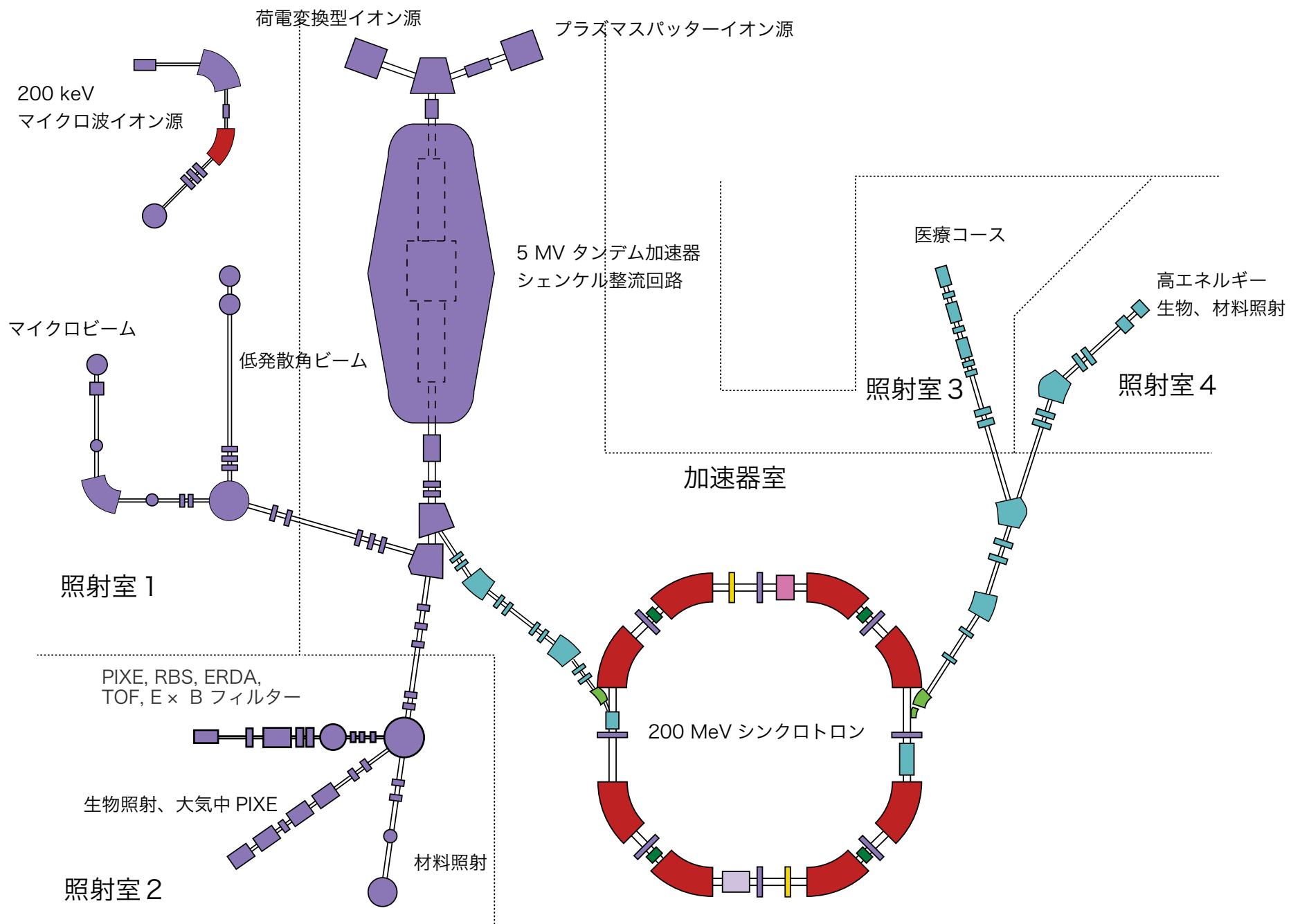
広いエネルギー領域 a few ~ 200 MeV

ウォブリングによる照射野形成、カウンター実験

取り出しビーム電流、時間構造の制御

イオンビームによる精密微量分析

ビームエネルギー制御、ビーム形状制御



200 keV
マイクロ波イオン源

荷電変換型イオン源

プラズマスパッターイオン源

5 MV タンデム加速器
シェンケル整流回路

医療コース

高エネルギー
生物、材料照射

照射室 3

照射室 4

加速器室

マイクロビーム

低発散角ビーム

照射室 1

PIXE, RBS, ERDA,
TOF, E × B フィルター

生物照射、大気中 PIXE

照射室 2

材料照射

200 MeV シンクロトロン

3 タンデム加速器とビームライン

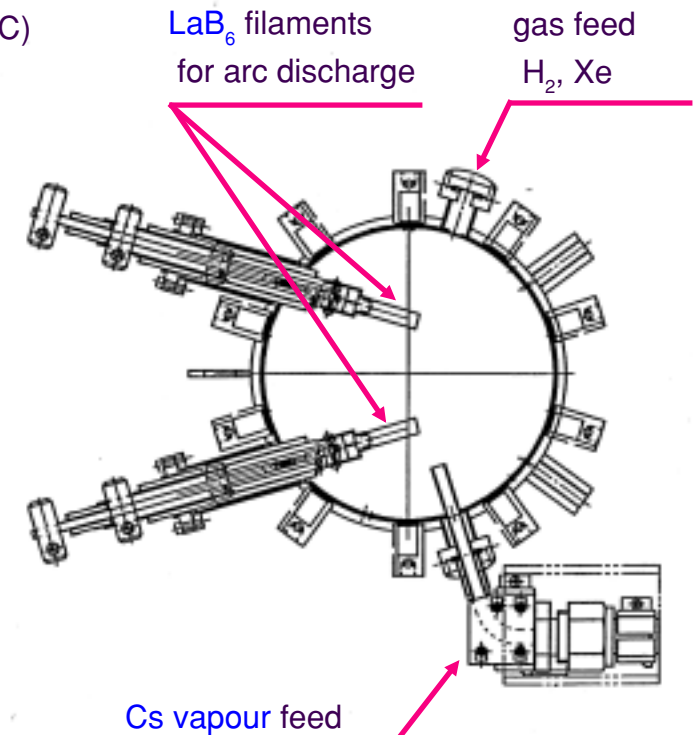
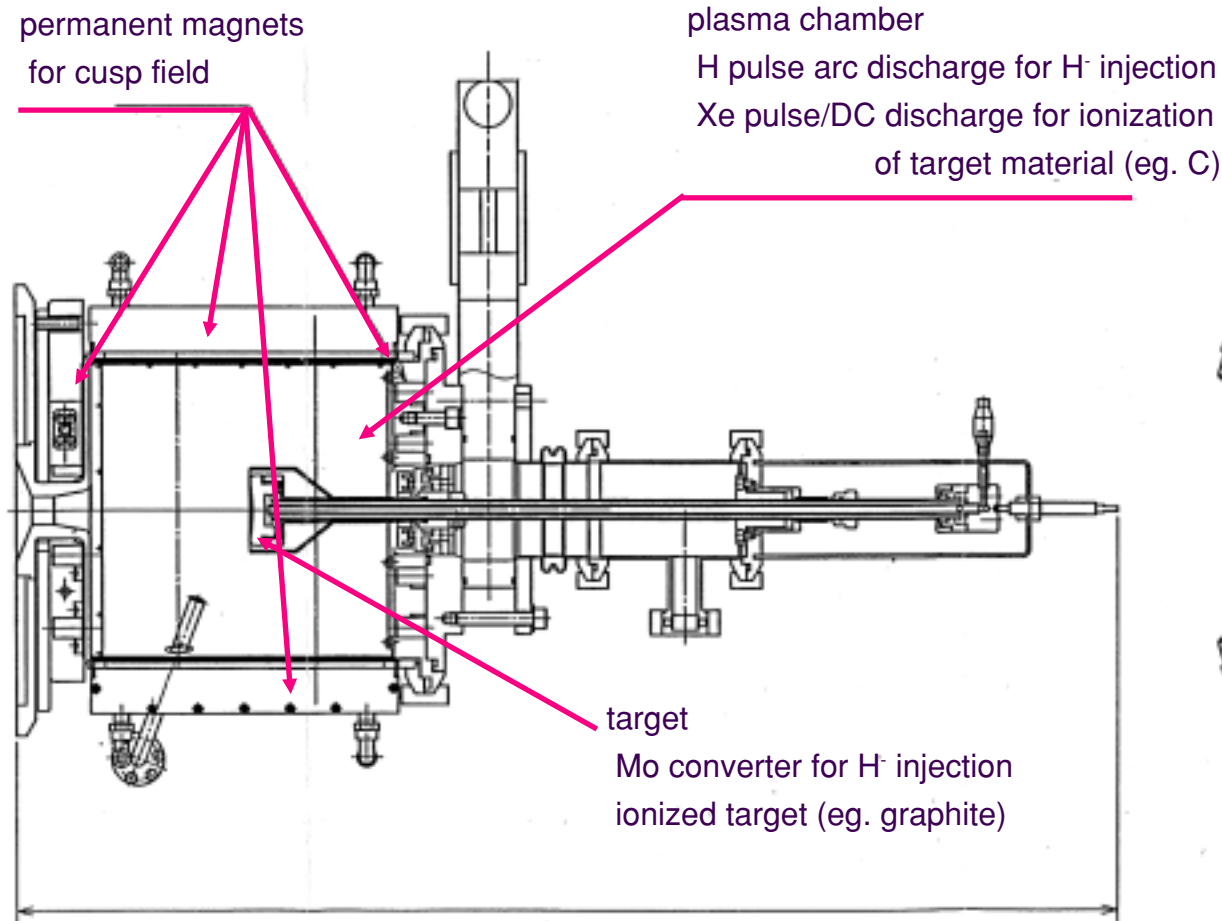
3.1 イオン源

Plasma sputter ion source

Typical pulse operation: duration = 250 ms repetition = 25 Hz

Maximum peak current of H⁻: 18 mA

Usual operation: 8 mA



プラズマスパッター負イオン源開発

旧イオン源における問題点と解決

- ・スパッターターゲットの頻繁なクリーニングの必要性

セシウムの過剰供給

→セシウムバルブ取り付け

フィラメントやチャンバーからのコンタミネーションのターゲットへの付着

→コンディショニング持続性の向上

(ターゲット電位給電部へコンデンサーバンク追加)

不完全！！

新イオン源

旧イオン源の改良点を受け継ぎ、さらに、

プラズマ生成、閉じ込め効率、スパッター効率向上のため、チャンバーデザインを変更

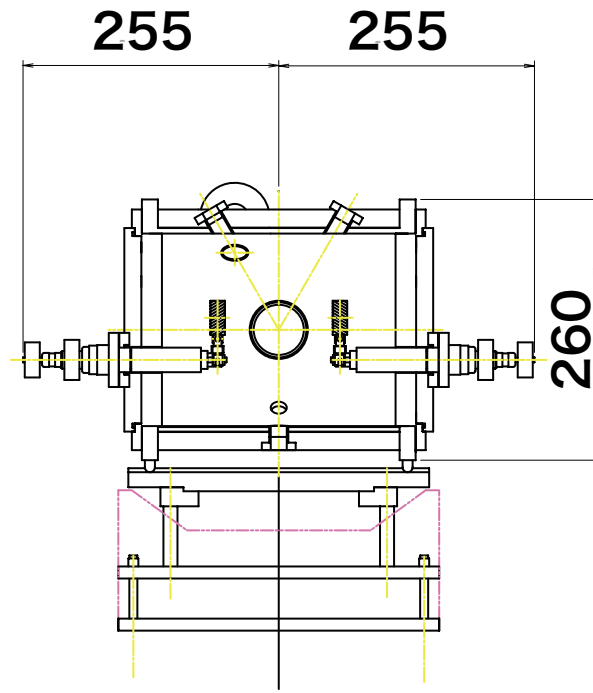
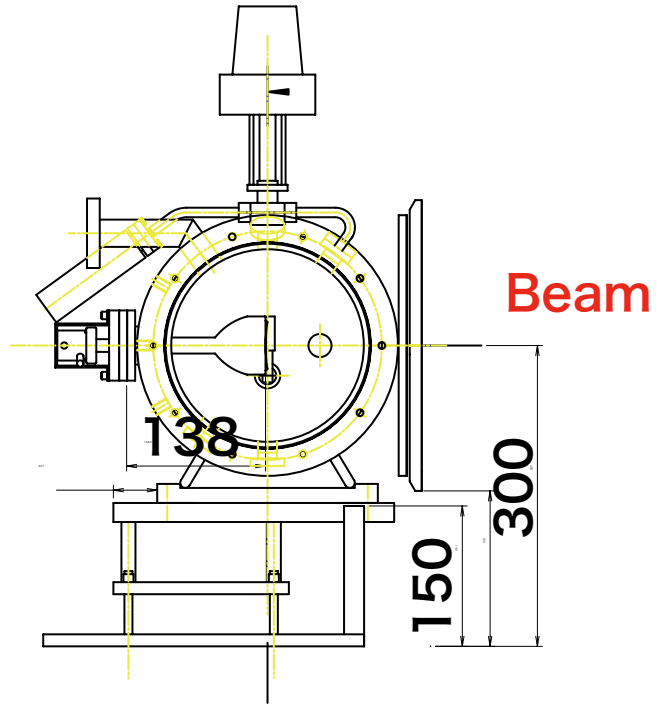
副次効果として

フィラメント位置変更→コンタミネーションの減少効果

セシウム導入孔変更→セシウム消費量減少

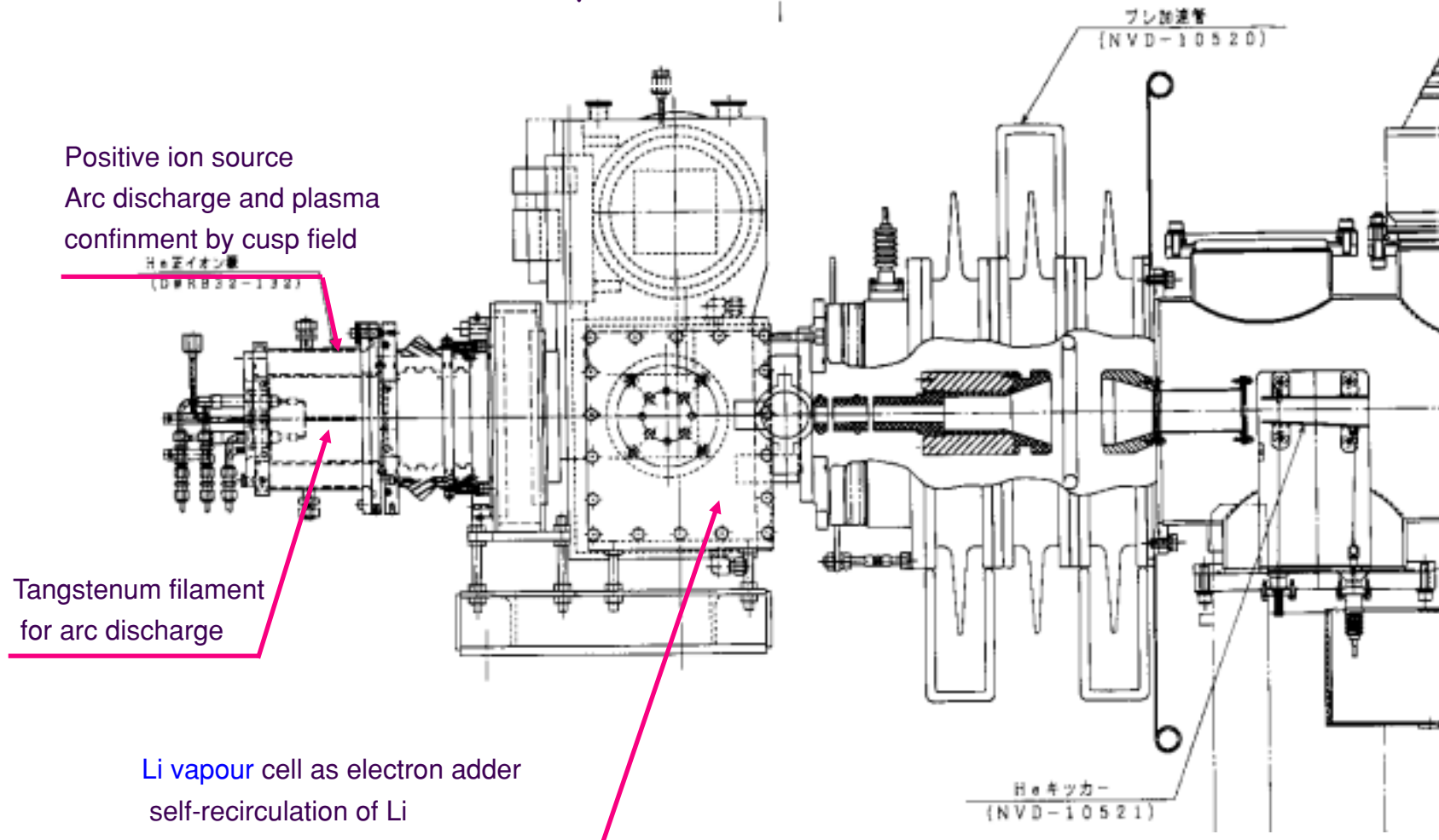
セシウムリザーバー大型化→セシウム充填回数減少

開発されたイオン源はテスト運転において、コンディショニングの早さ、目的のビーム量、ビーム量の安定性、運転終了後解体時の内部の様子などについて、良好な結果を収めたにもかかわらず、医療運転では使用を認められないこととなった。



Charge exchange ion source

He⁻ DC: 36 μ A
H⁻ DC: 16 μ A

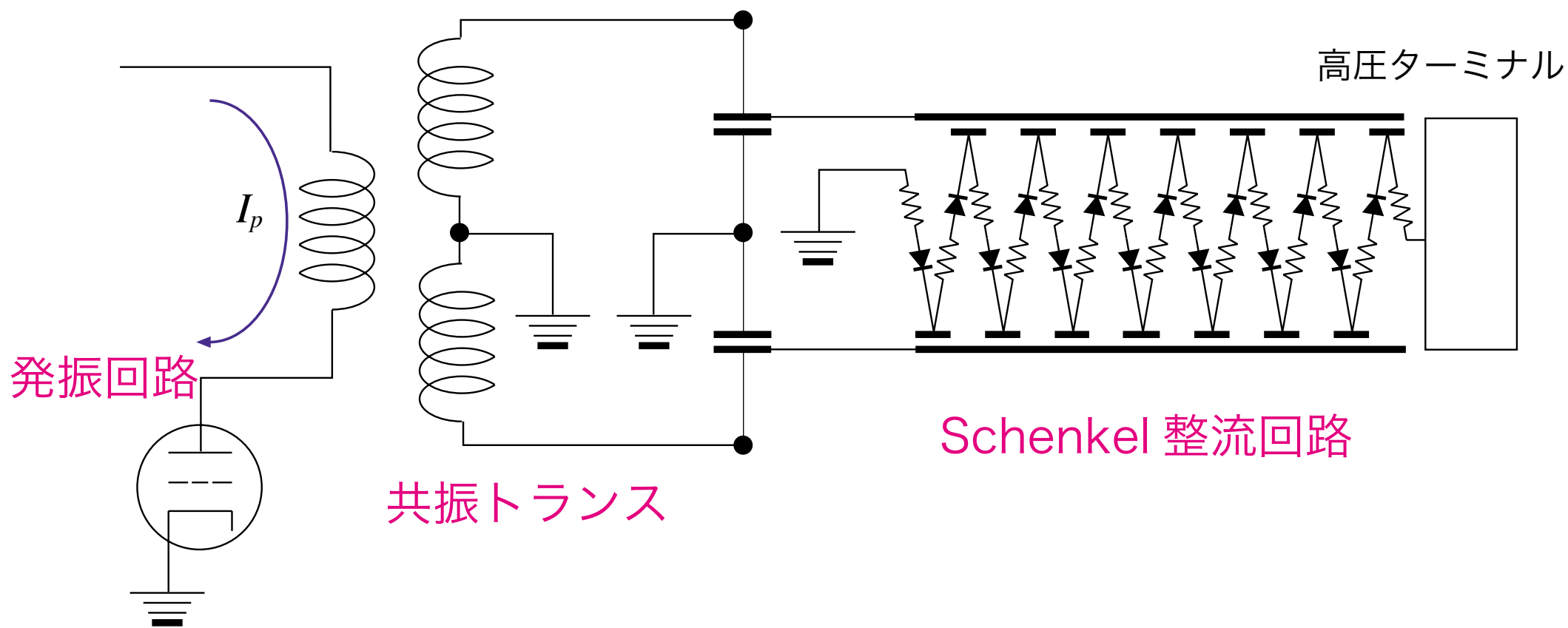


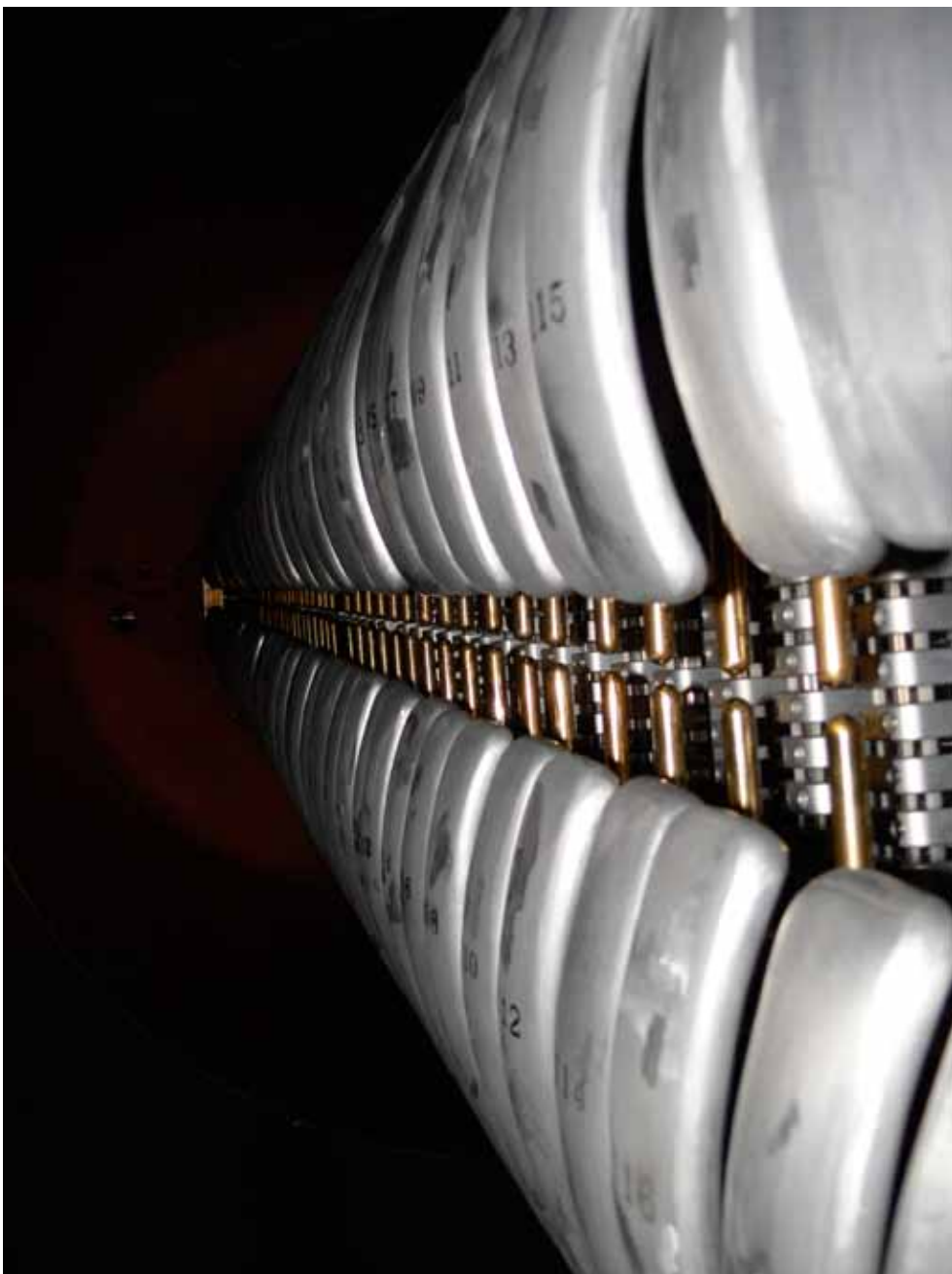


3.2 タンデム加速器

Generation of HV	Schenkel 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(50l/s/pump)
Injected ion <i>ME</i>	6 MeV amu

倍電圧整流回路カスケード（Schenkel 回路）による昇圧

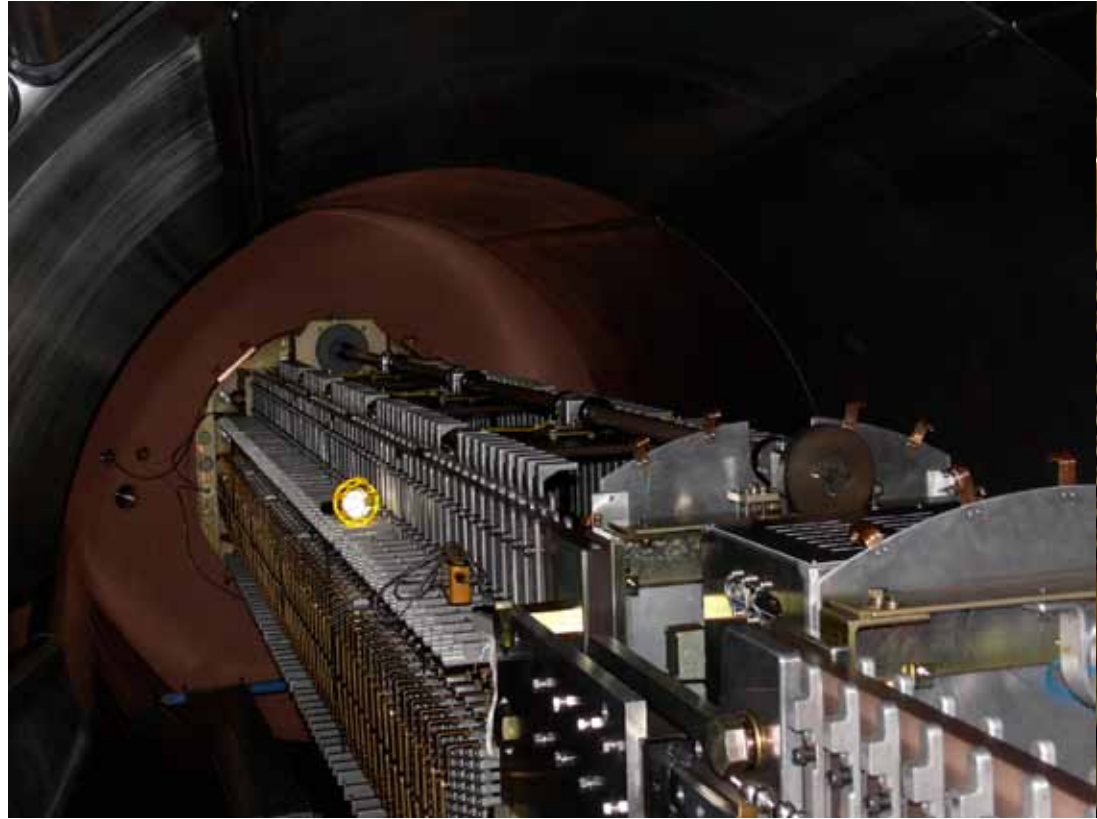




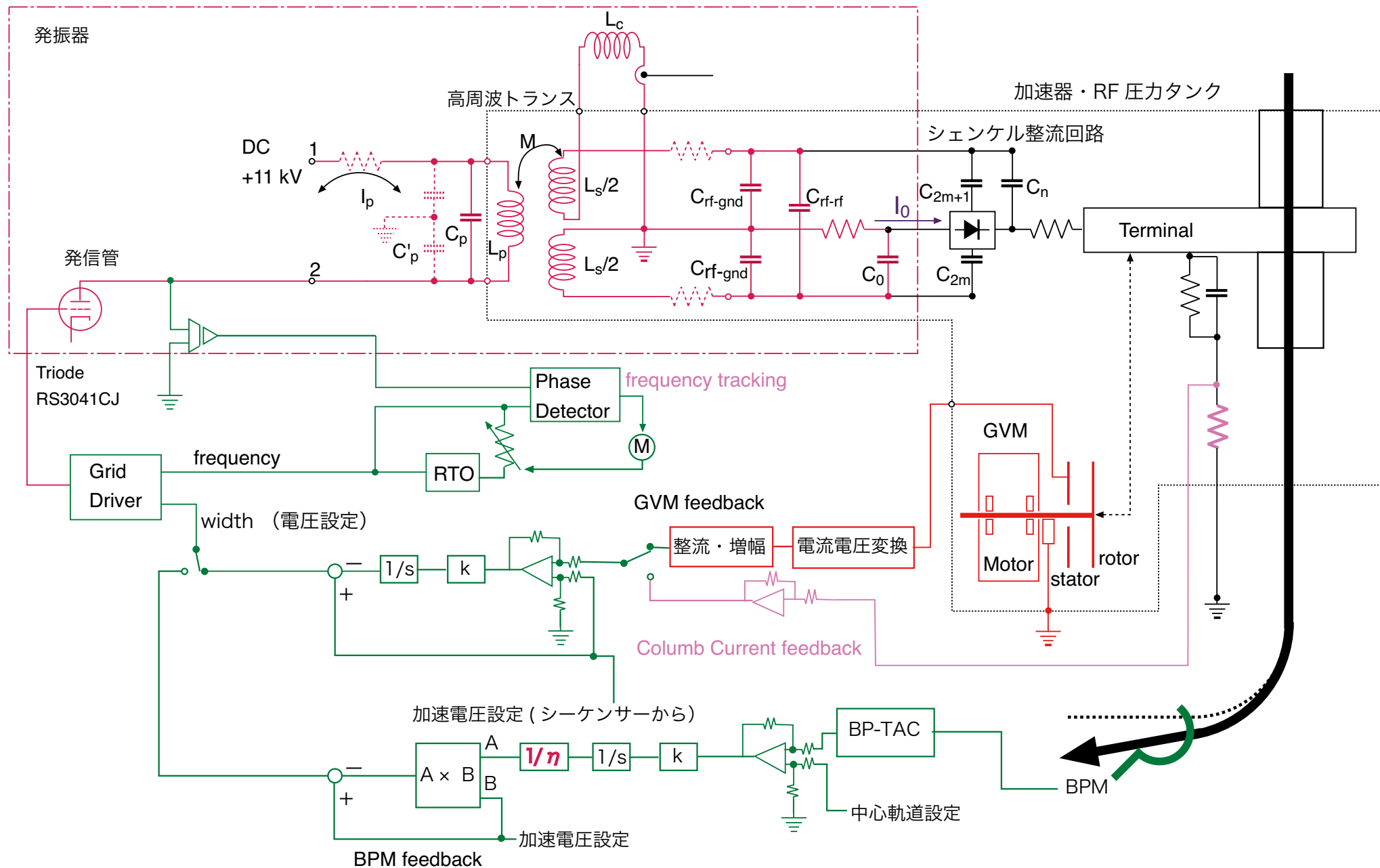
↑ 低エネルギー側コラム

← 高エネルギー側コラム

ダイオードスタックが見える。



電圧安定化方法



3.3 タンデムビームラインと実験

照射室 1 (ターミナル電圧 1.7 MV まで)

物性分析コース (低発散角ビーム)

元素分析コース (マイクロビーム PIXE)

照射室 2 (ターミナル電圧 5 MV まで)

イオン注入コース

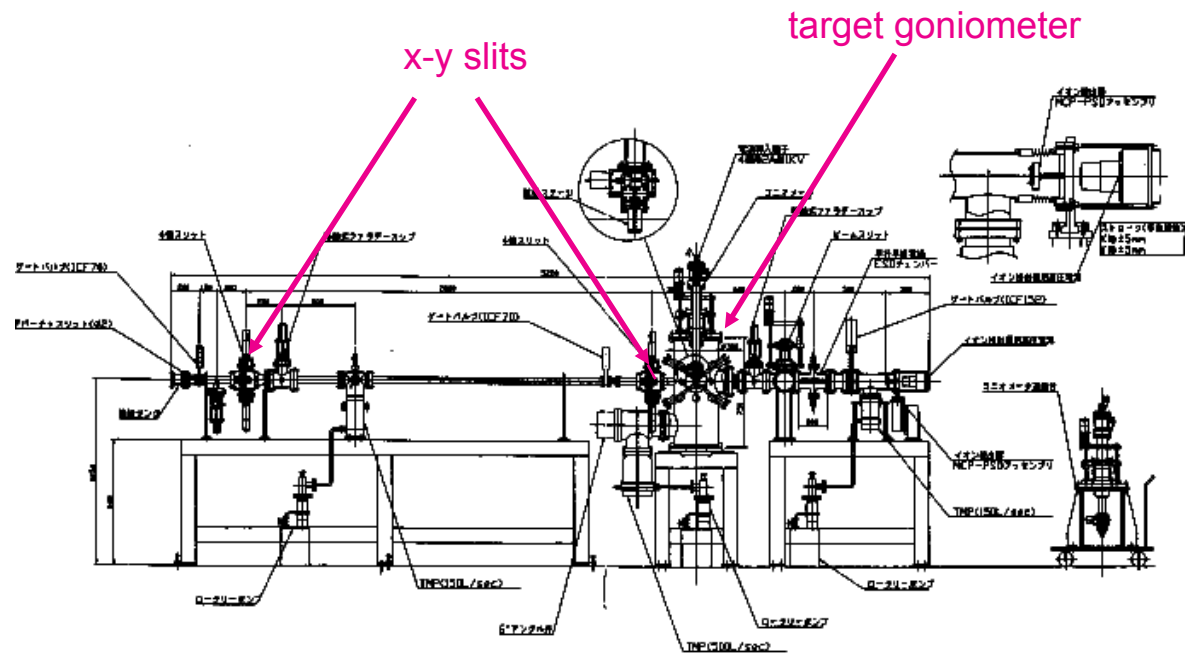
生物照射コース (大気取り出し)

イオン分析コース

Material analysis course

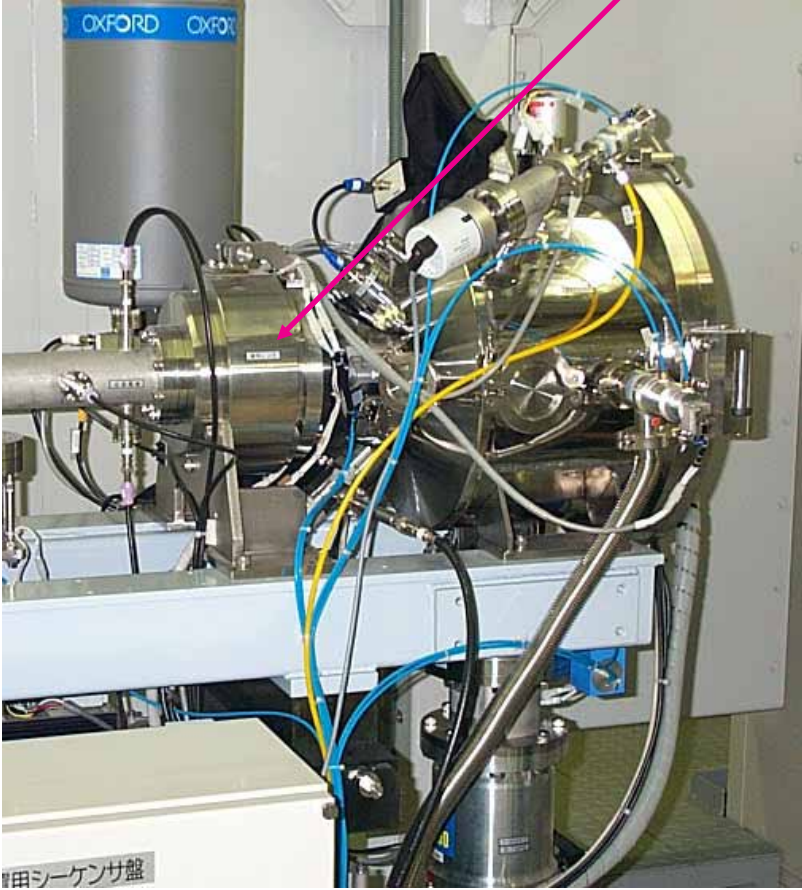
Using a couple of micro slits,
obtain almost parallel beam

Channeling RBS



μ -beam course

PIXE, (channeling) RBS



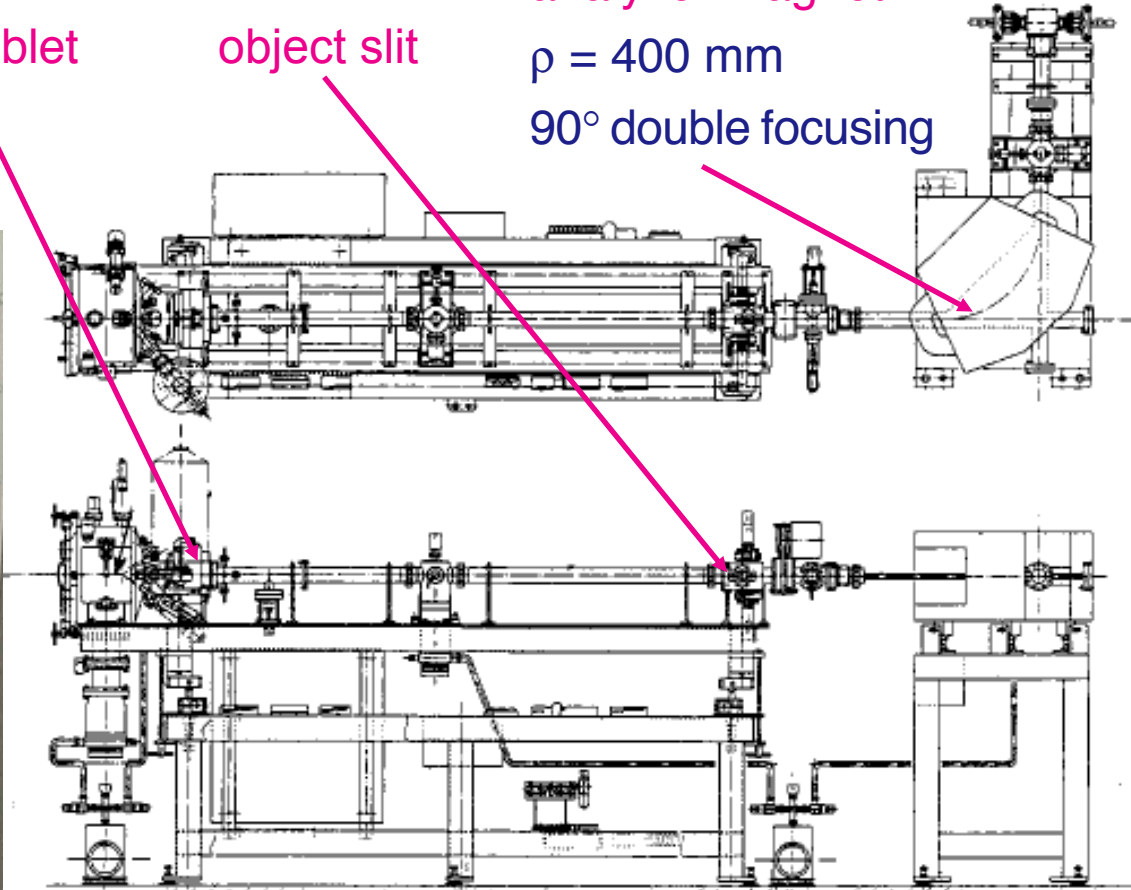
Q-doublet

object slit

analyzer magnet

$\rho = 400 \text{ mm}$

90° double focusing



magnification

$(x|x)=1/3.6$

$(y|y)=1/14$

In-air μ -beam course

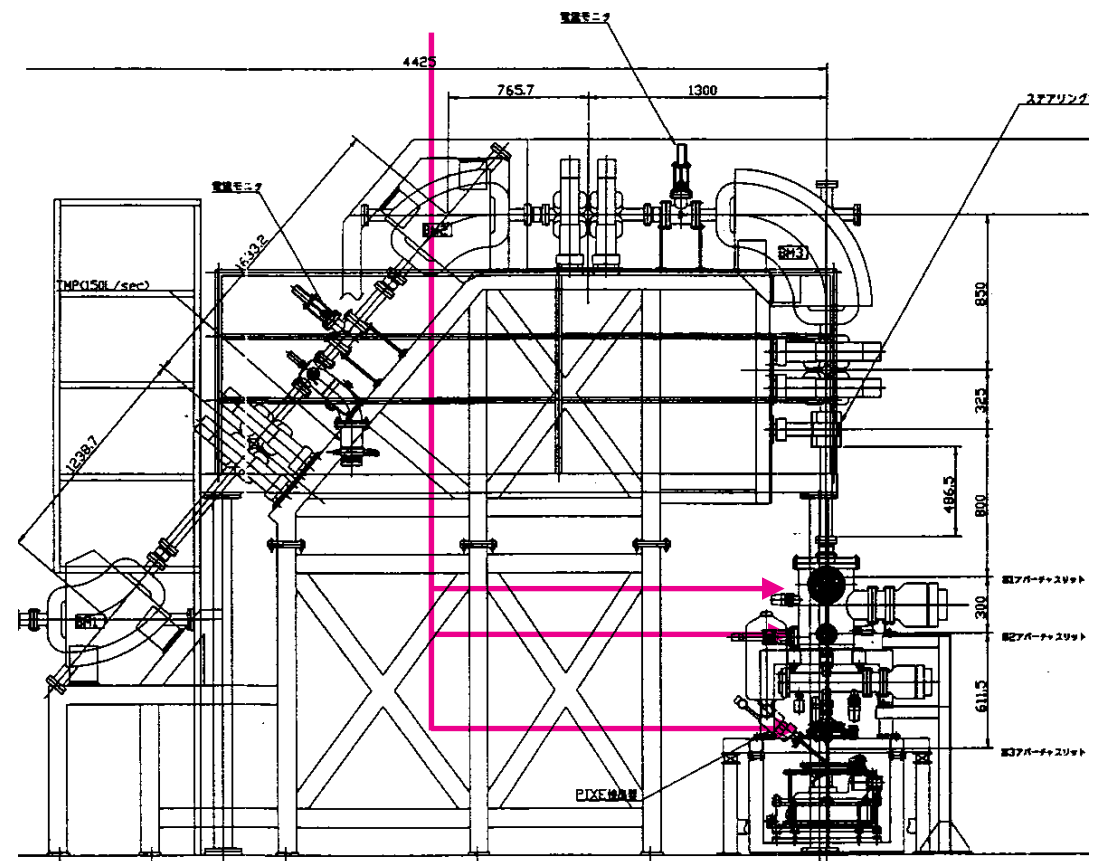
extraction of beam in air

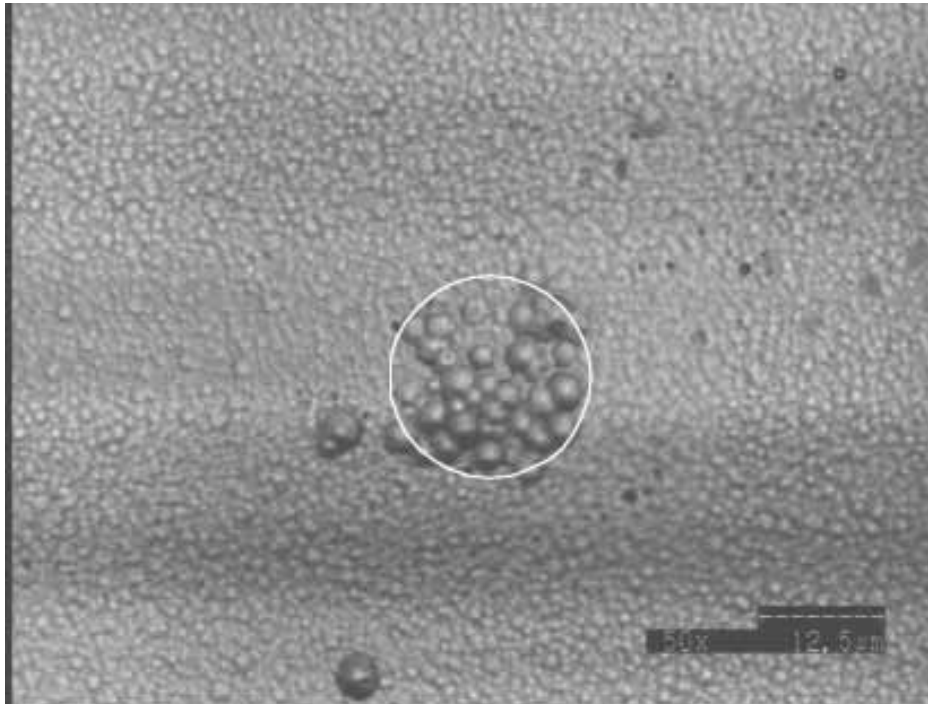
PIXE analyses of art object, archaeological and biological samples

Improvement of species

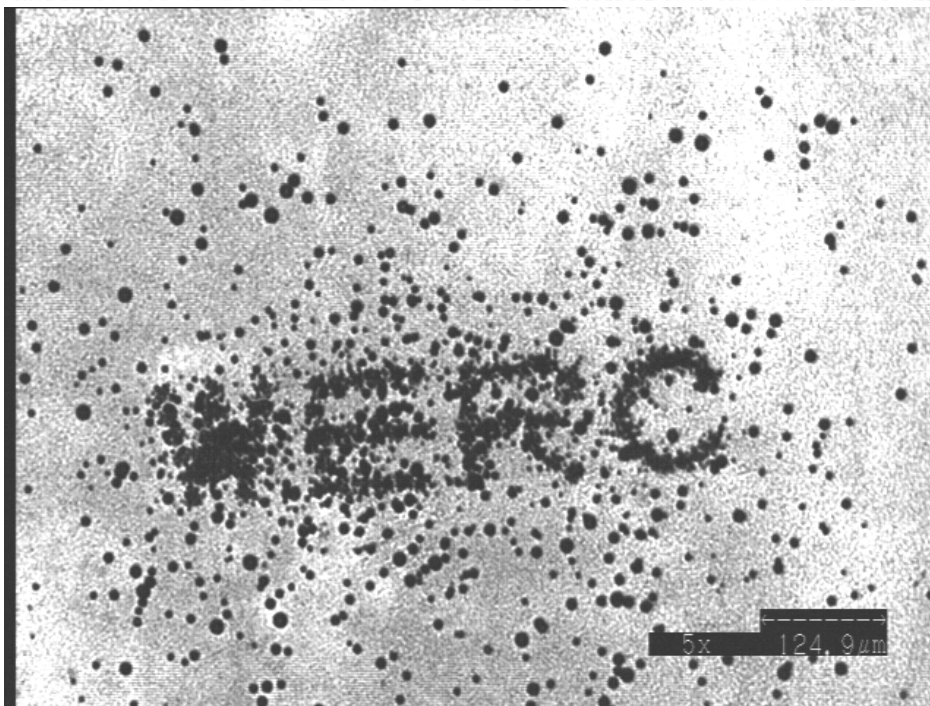


aperture (2 mm, 0.5mm, 10 μ m)





A result of the measurement of the beam size by use of a CR-39 track detector. Several tracks exist outside the picture.

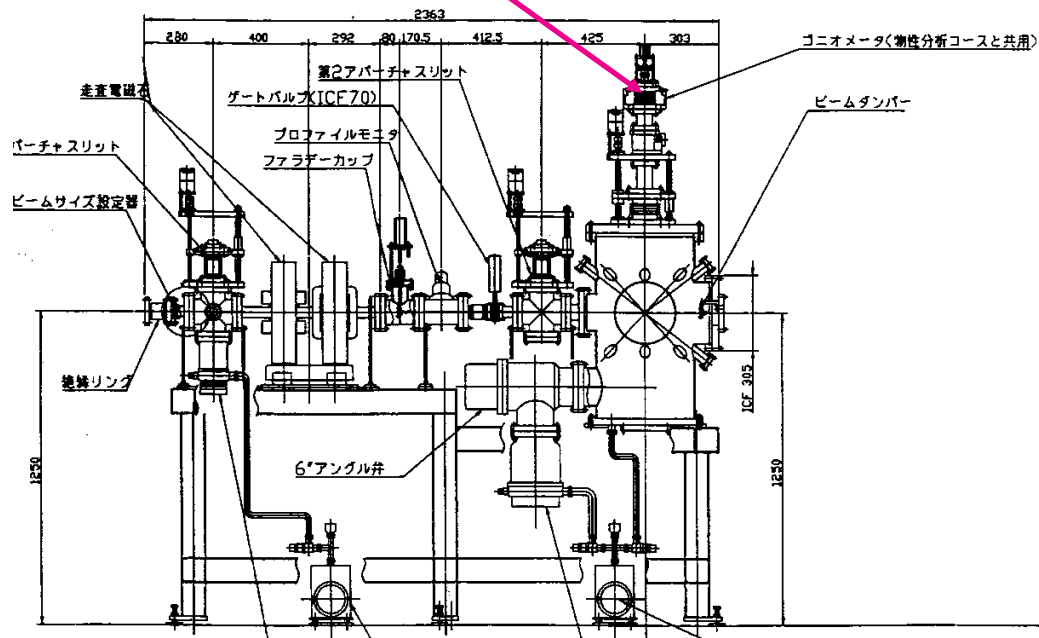


A hit pattern created by automated irradiation. The size of each letter is 100 mm.

Ion implantation course

Target goniometer

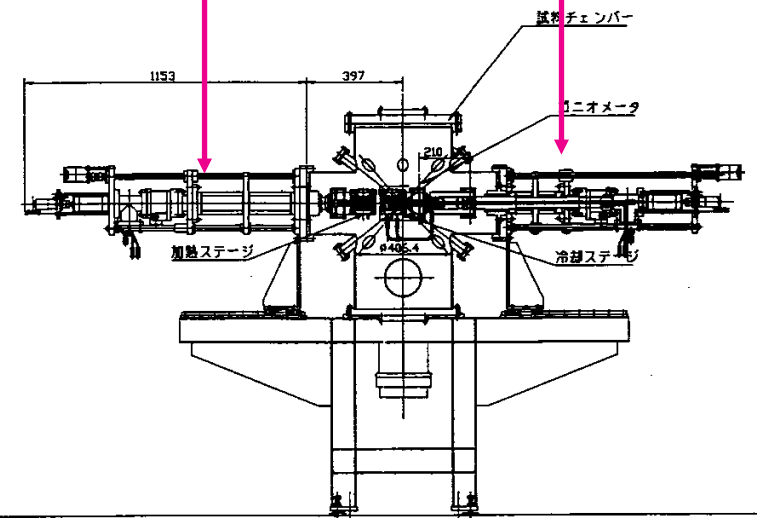
(available in this chamber and material analysis course)



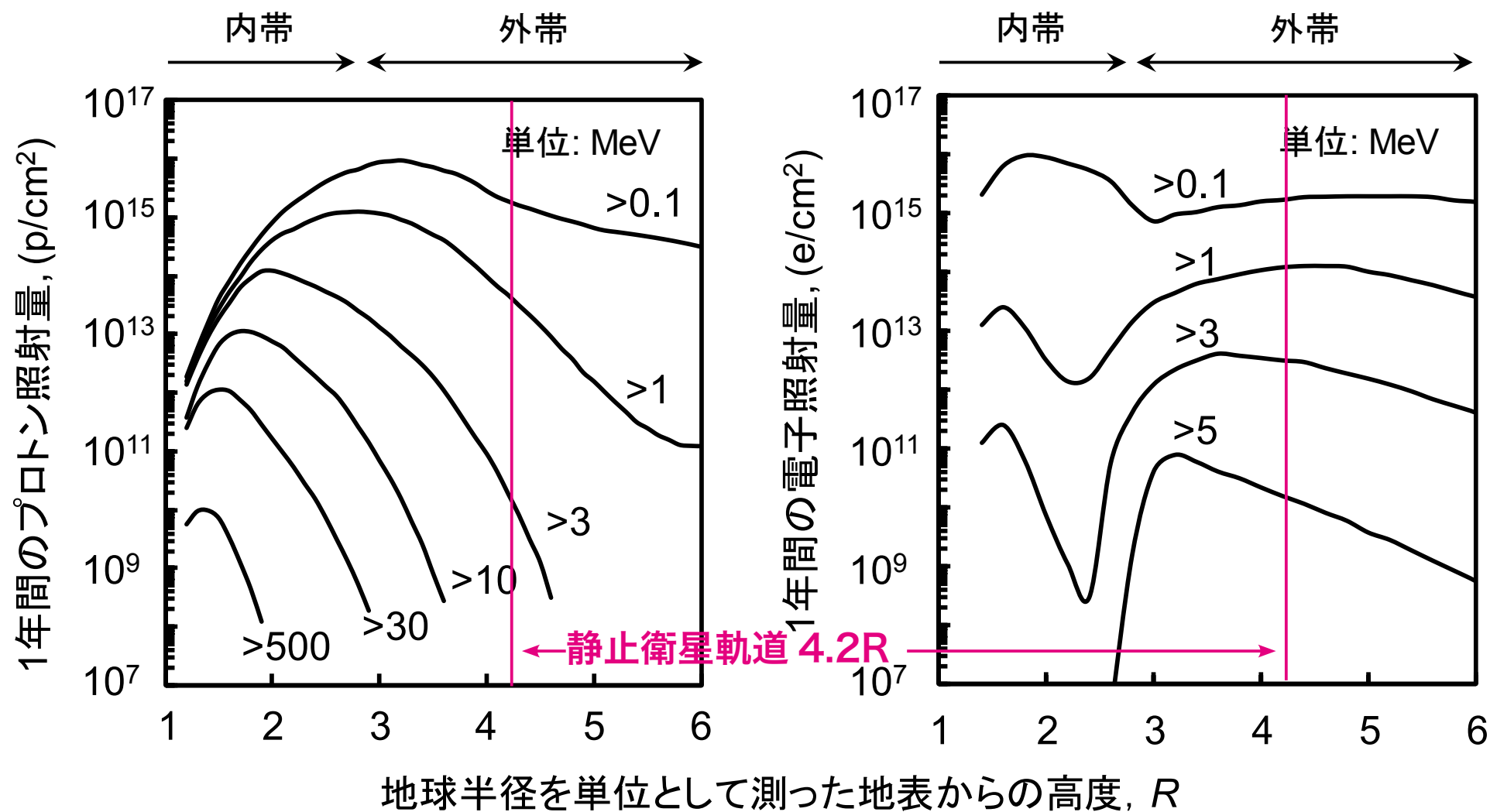
Two irradiation stage

hot stage (1000 K)

cold stage (100 - 300 K)



半導体デバイス ZnO など、耐放射線性能の評価



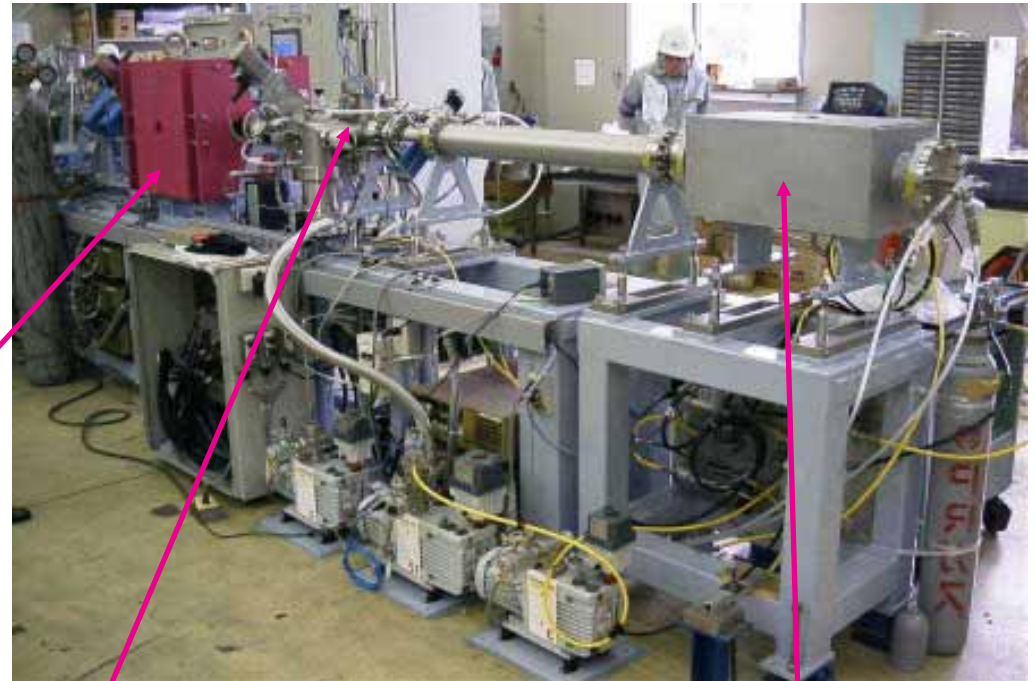
Ion beam analysis course

Scattering chamber



target goniometer (5 axis)
ERDA-RBS coin TOF
X-ray detector (Si&CZT)

$E \times B: 45\text{kV/cm} \times 0.4\text{T}$

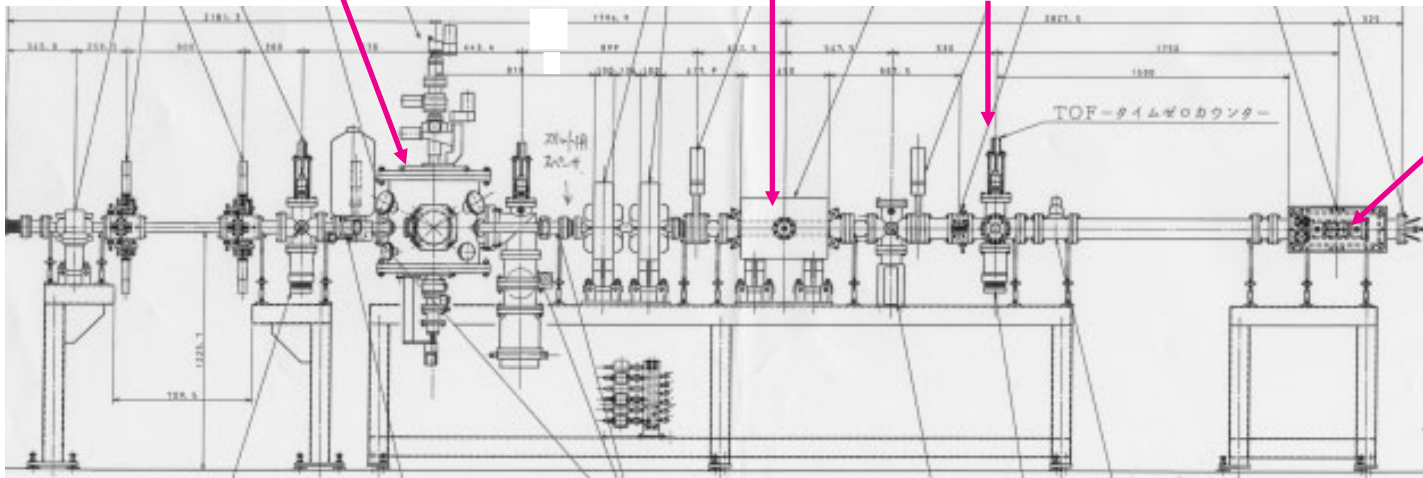


TOF time zero

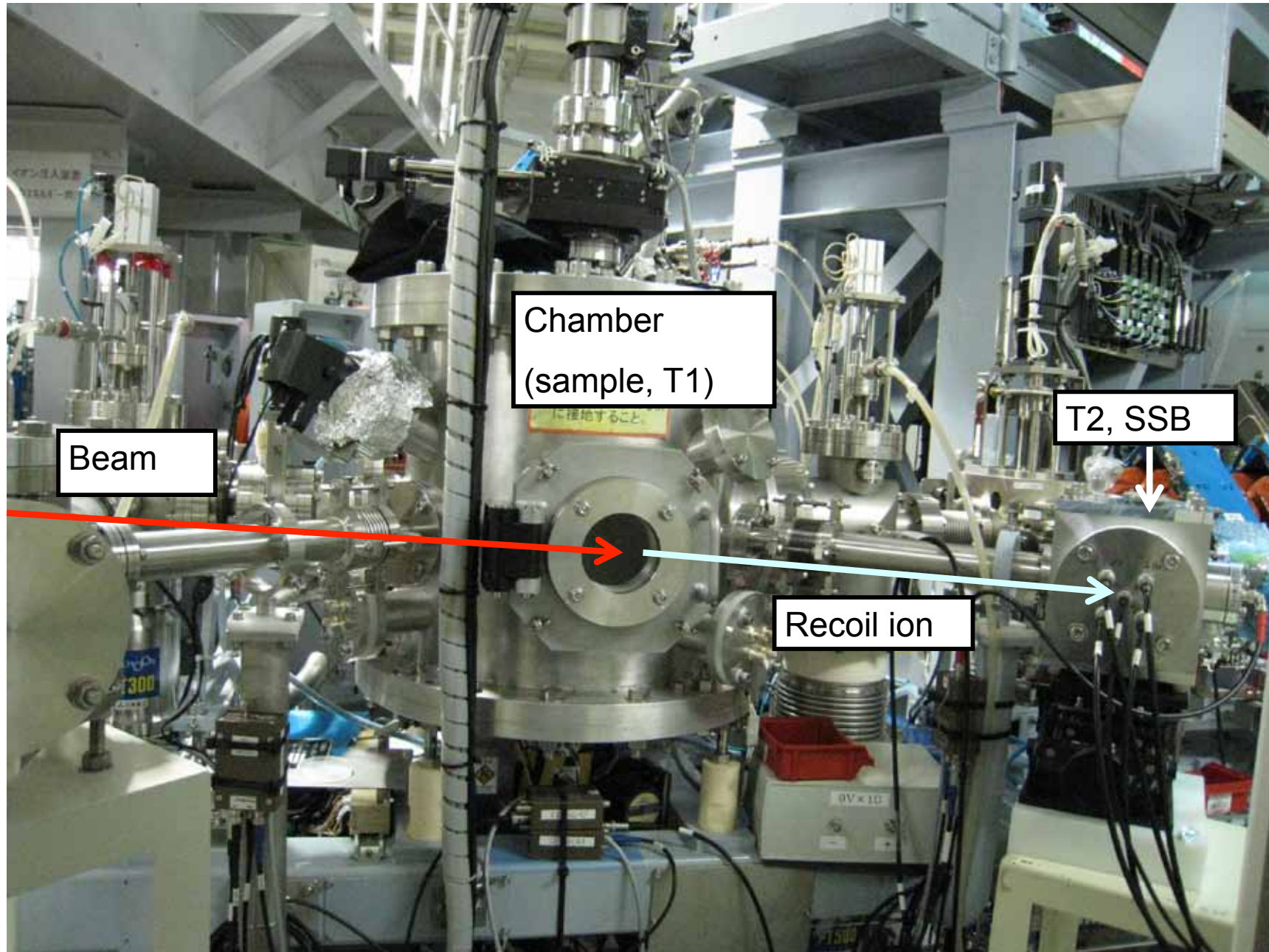
Gas counter

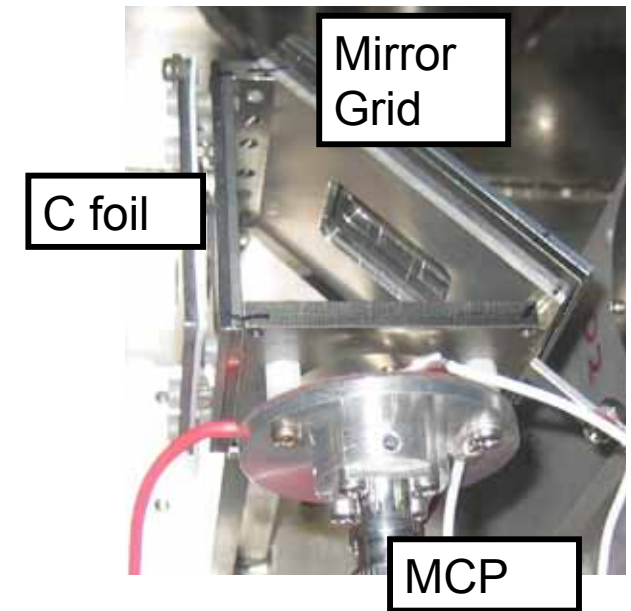
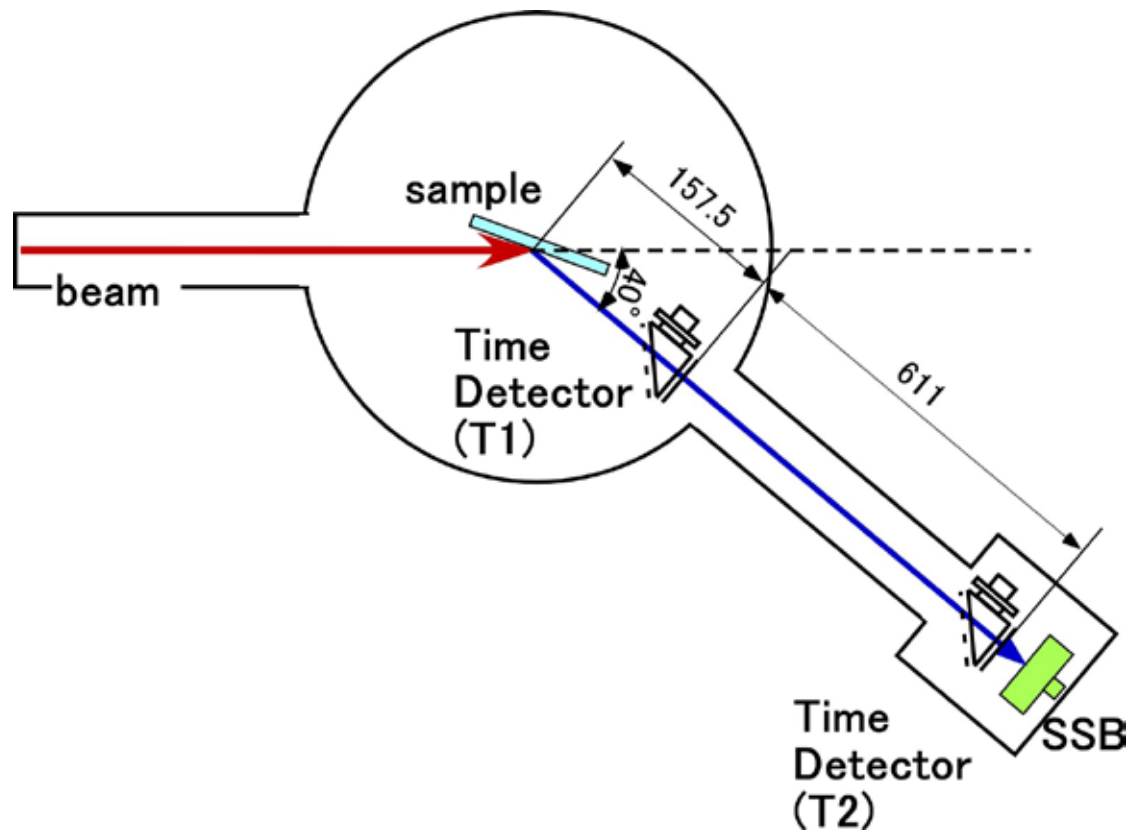
foil, electrostatic mirror MCP

multi (6-) anode type



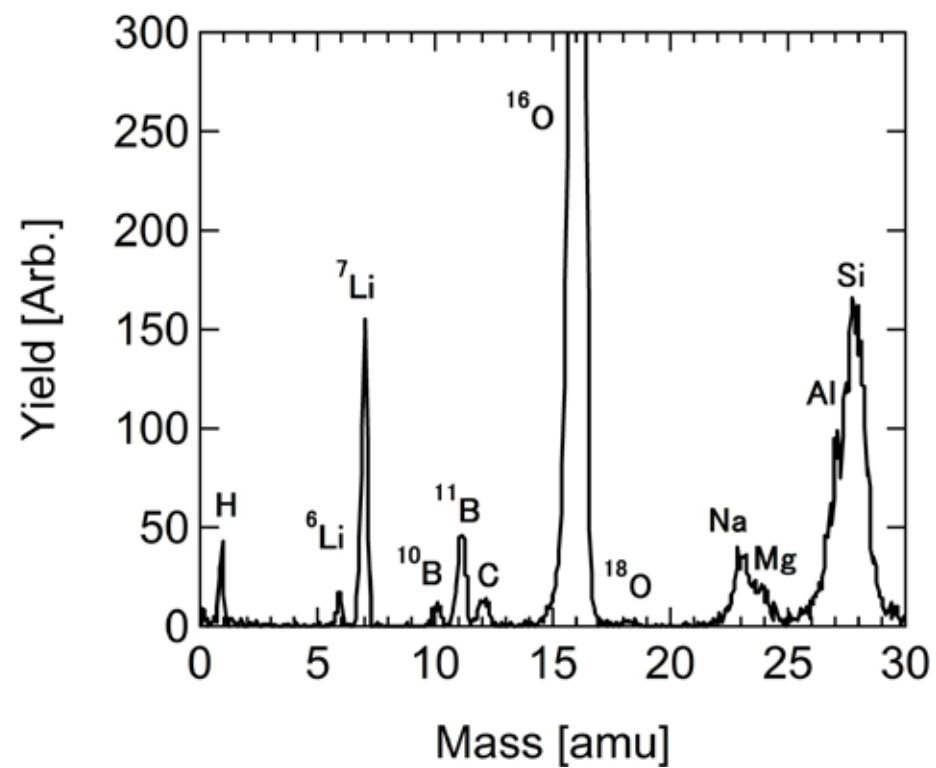
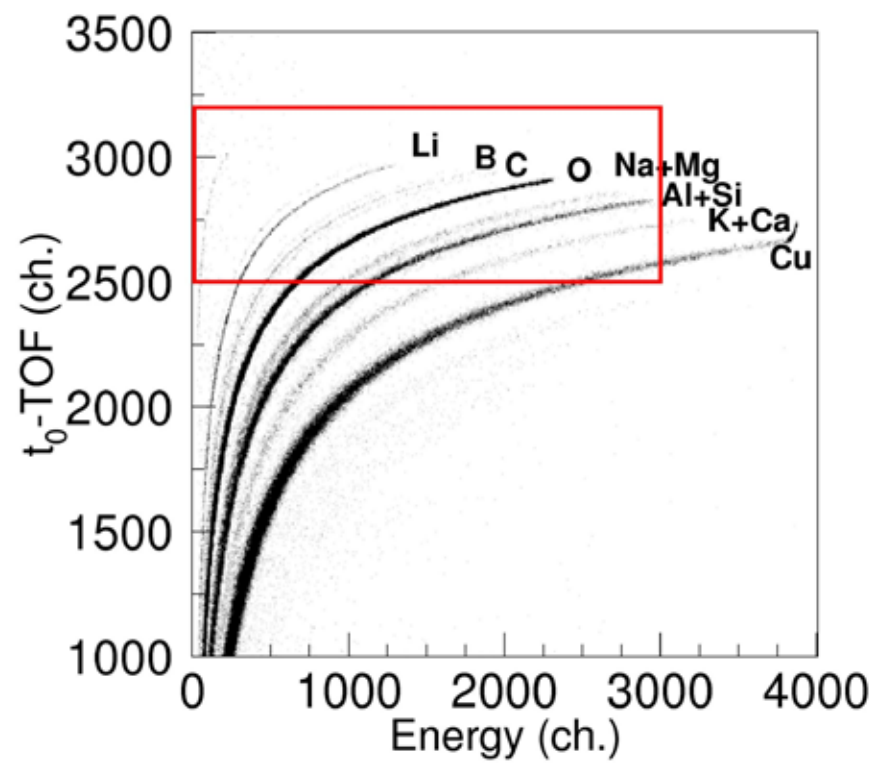
TOF-ERDA システムの開発





Time detector

**ERDA(Elastic Recoil Detection Analysis) による
反跳核のエネルギー測定に加え、TOF 測定により
質量弁別性能を向上させる。**

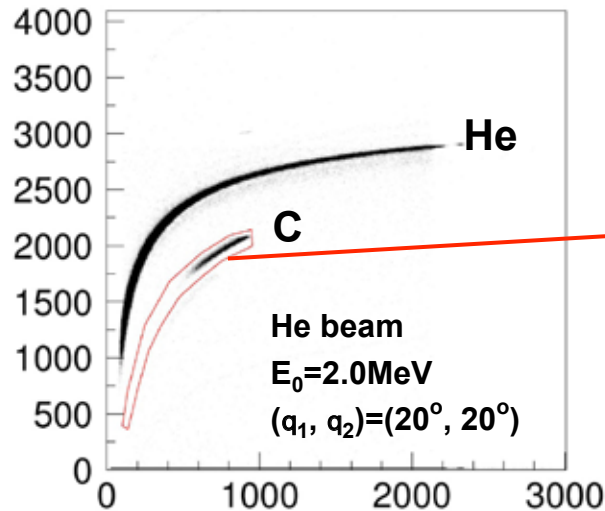


深さ分解能

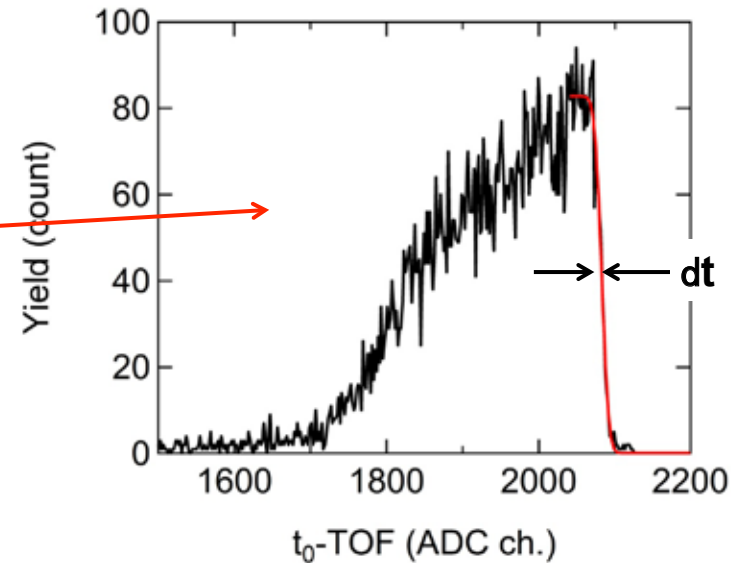
$$\delta E = \sqrt{\frac{8E^3}{ml^2}} \delta t$$

Si 上の C を α で衝撃した例

TOF vs. energy plot



TOF spectrum of recoil carbon



$$\delta X = \frac{\delta E}{[S]_{p,r}}, \quad [S]_{p,r} = K \frac{S_p(E_0)}{\sin \theta_1} + \frac{S_r(E_2)}{\sin \theta_2}$$

S_p, S_r : stopping power of projectile and recoil ions
 K : kinematical factor

**Depth resolution (FWHM) = 1.3 ± 0.1 nm
 @ $E_0 = 2.0$ MeV, $(\theta_1, \theta_2) = (35^\circ, 5^\circ)$**



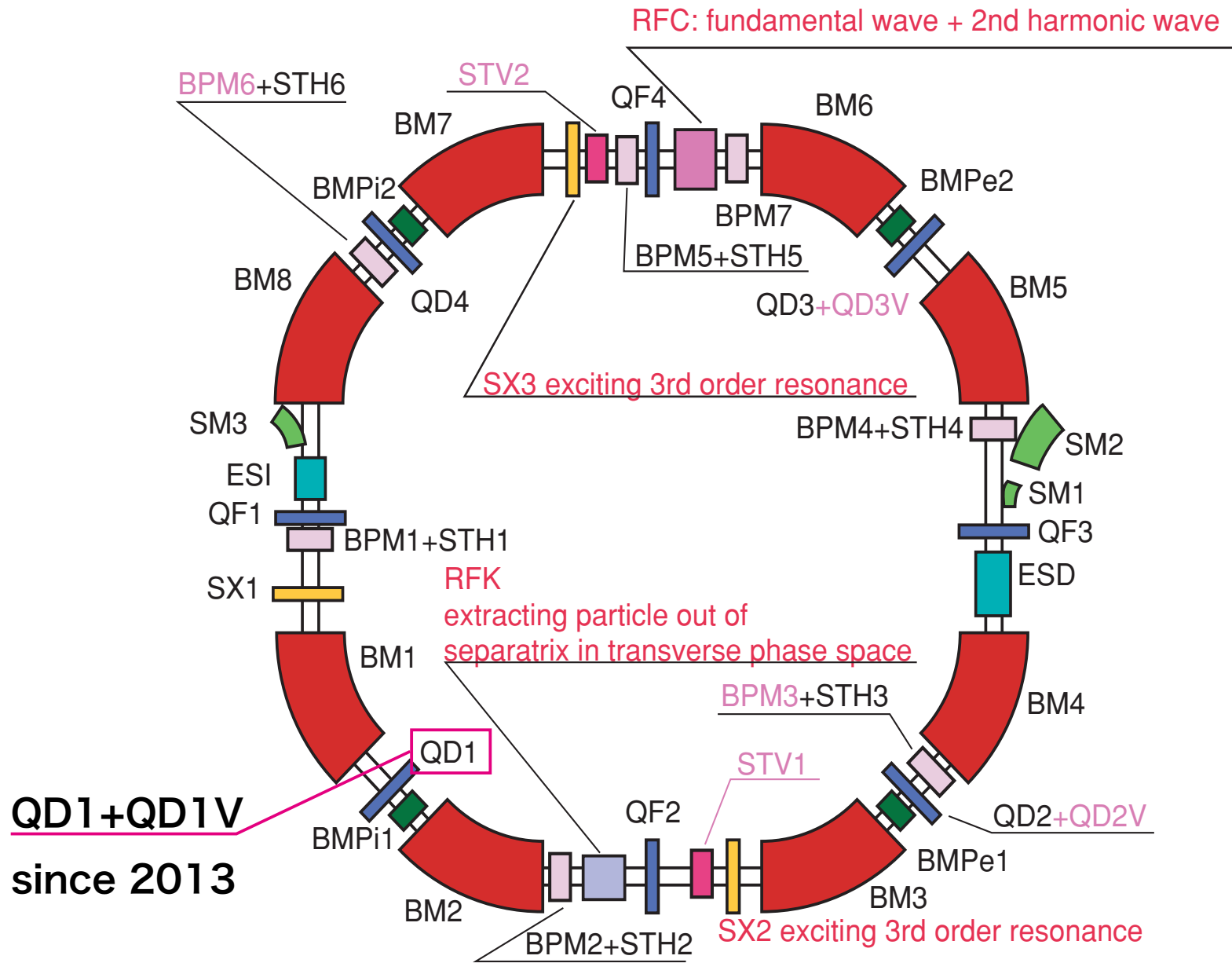
超高真空散乱槽
増設

4. シンクロトロンとビームライン

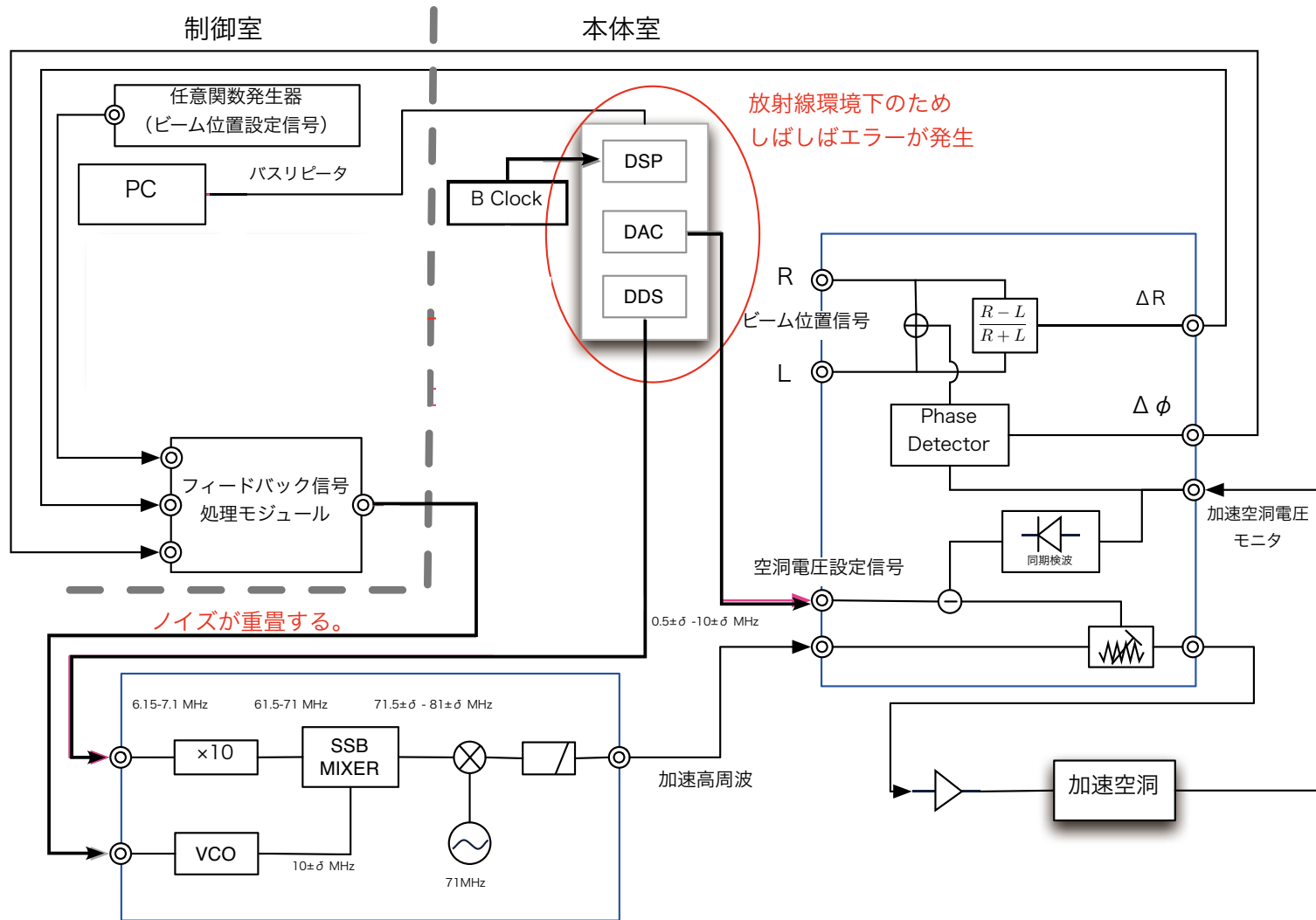
4.1 シンクロトロン



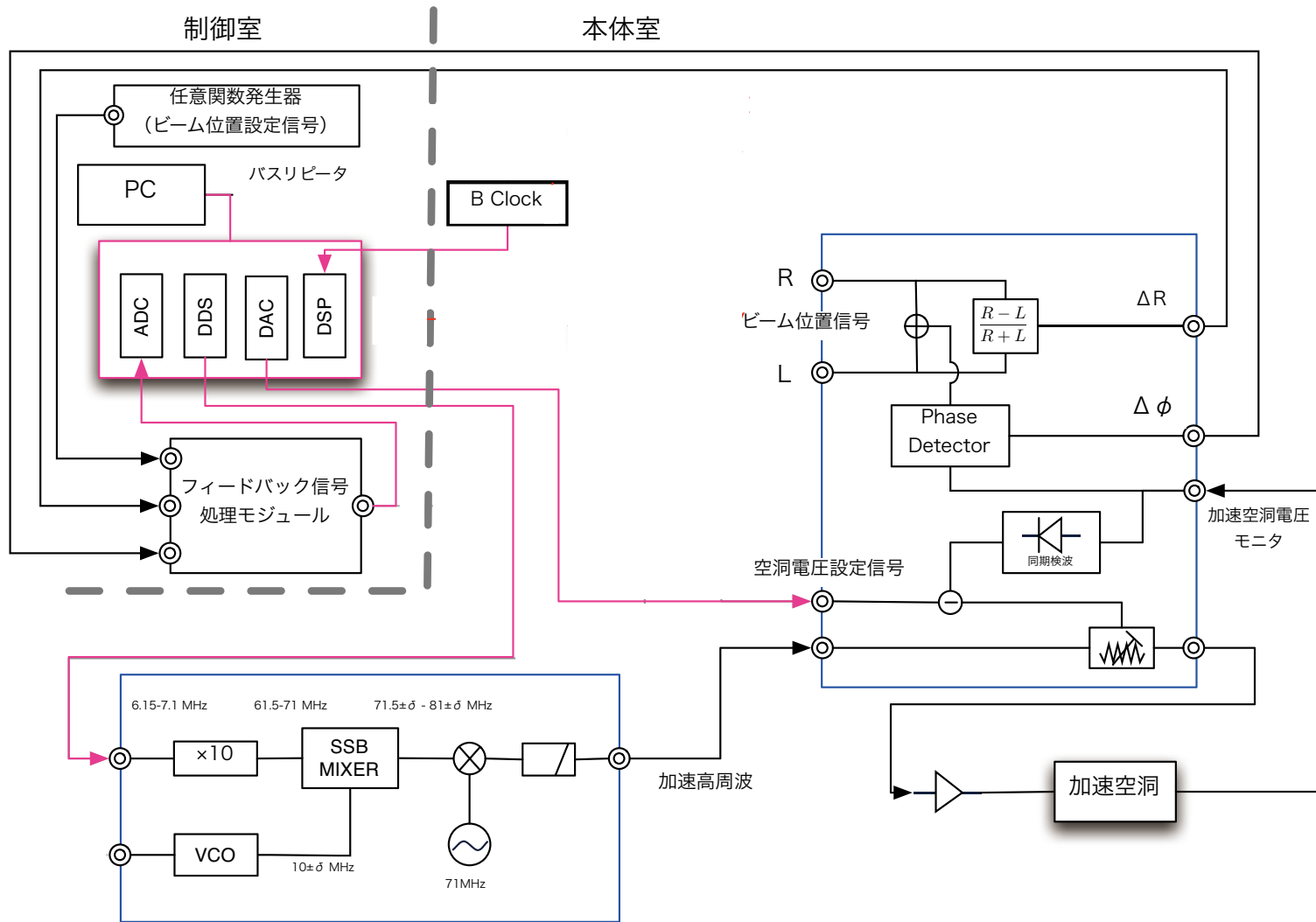
Incident energy		
H ⁺	10 MeV	(B _p =0.46Tm)
Heavy Ion	2.08 MeV/u	(B _p =0.42Tm)
Acceleration energy		
H ⁺	200 MeV	(B _p =2.15Tm)
Heavy Ion	55 MeV/u	(B _p =2.15Tm)
Period	0.5 Hz	
Lattice	QF-B-QD-B-	
Injection	multi-turn injection	
RF cavity	asynchronous RF cavity	
Extraction	Resonance-RF knockout	
Superperiodicity	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	



シンクロトロンビームフィードバック

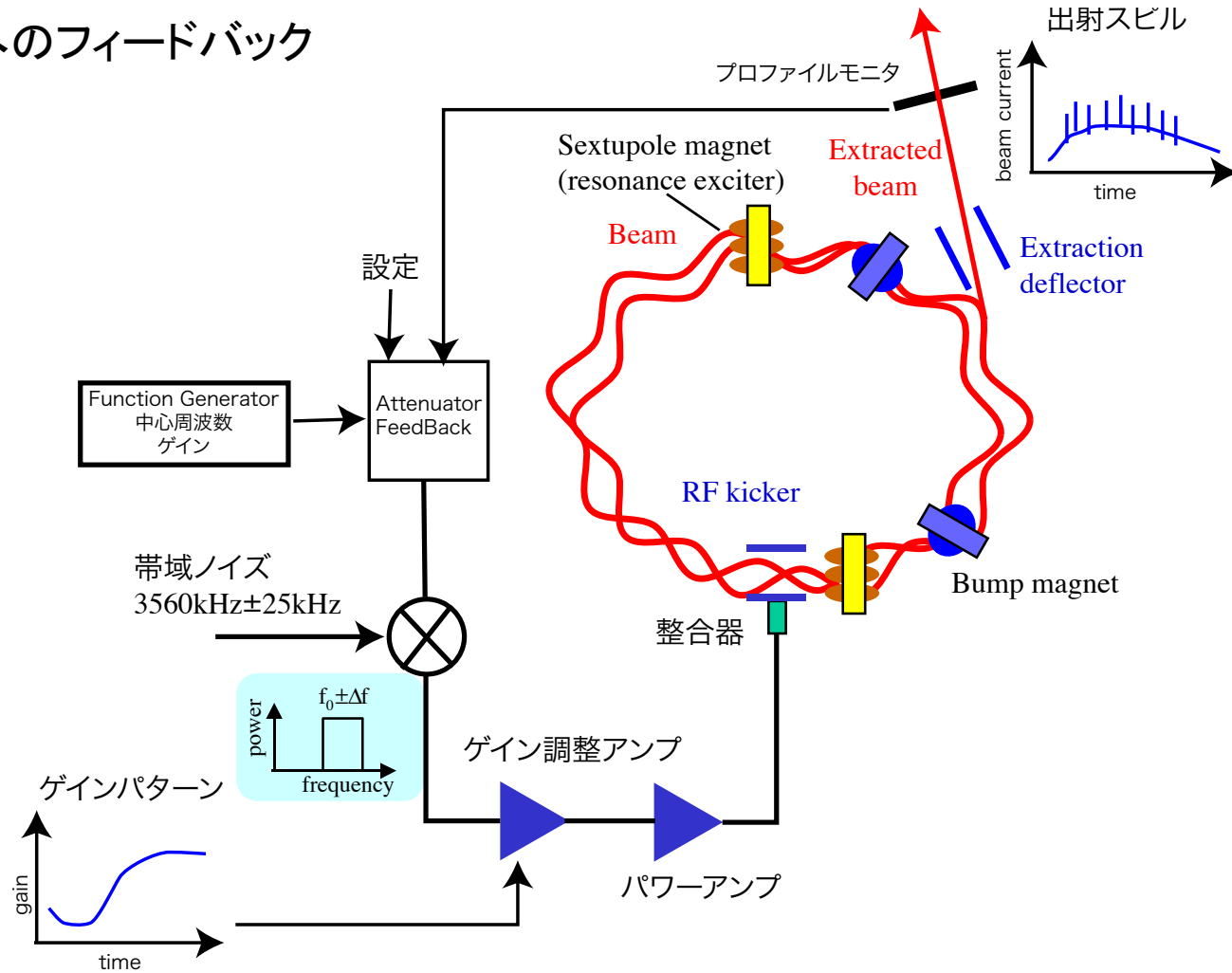


シンクロトロンビームフィードバック



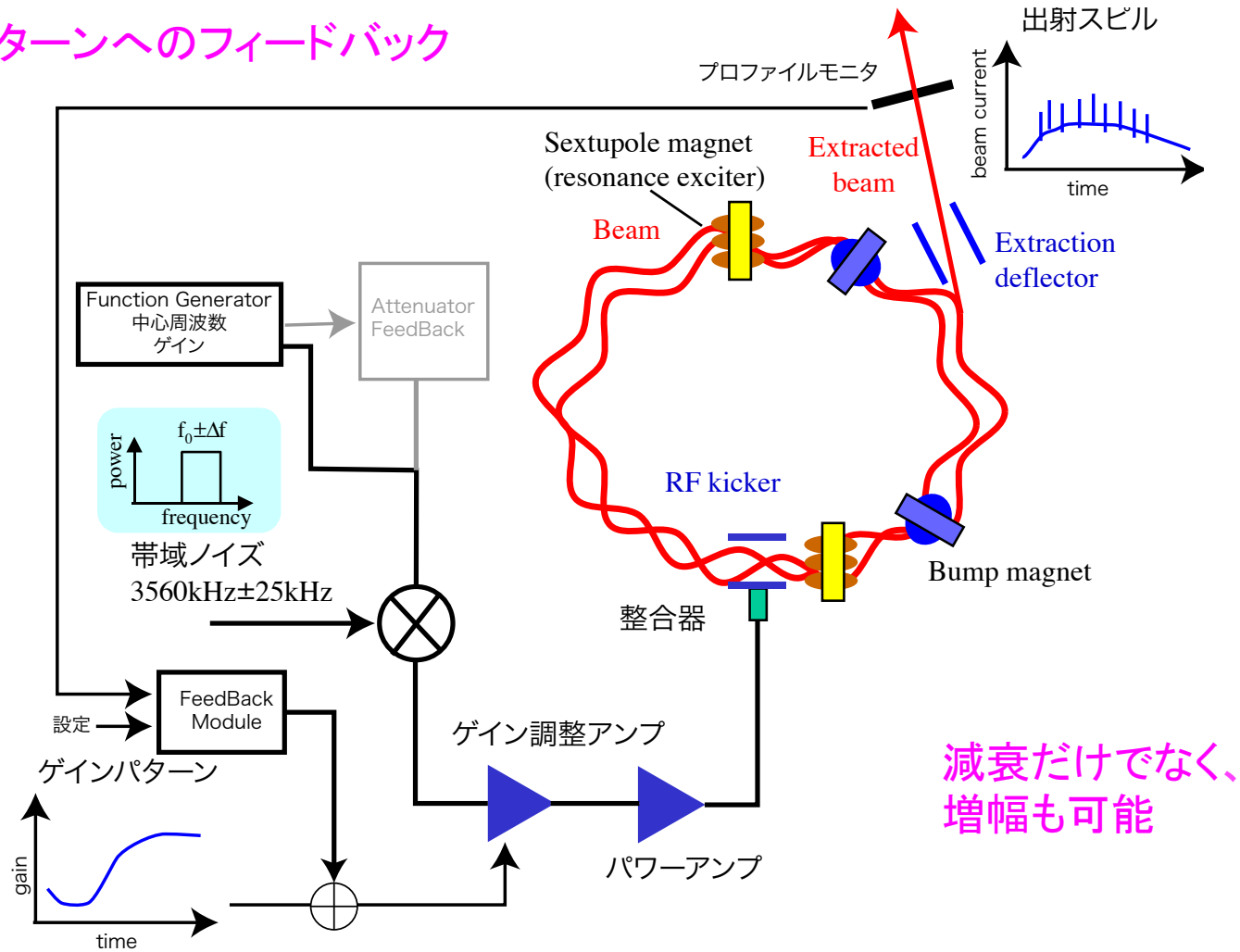
ビーム取り出し制御

減衰器へのフィードバック



ビーム取り出し制御

ゲインパターンへのフィードバック



4.2 シンクロトロンビームライン

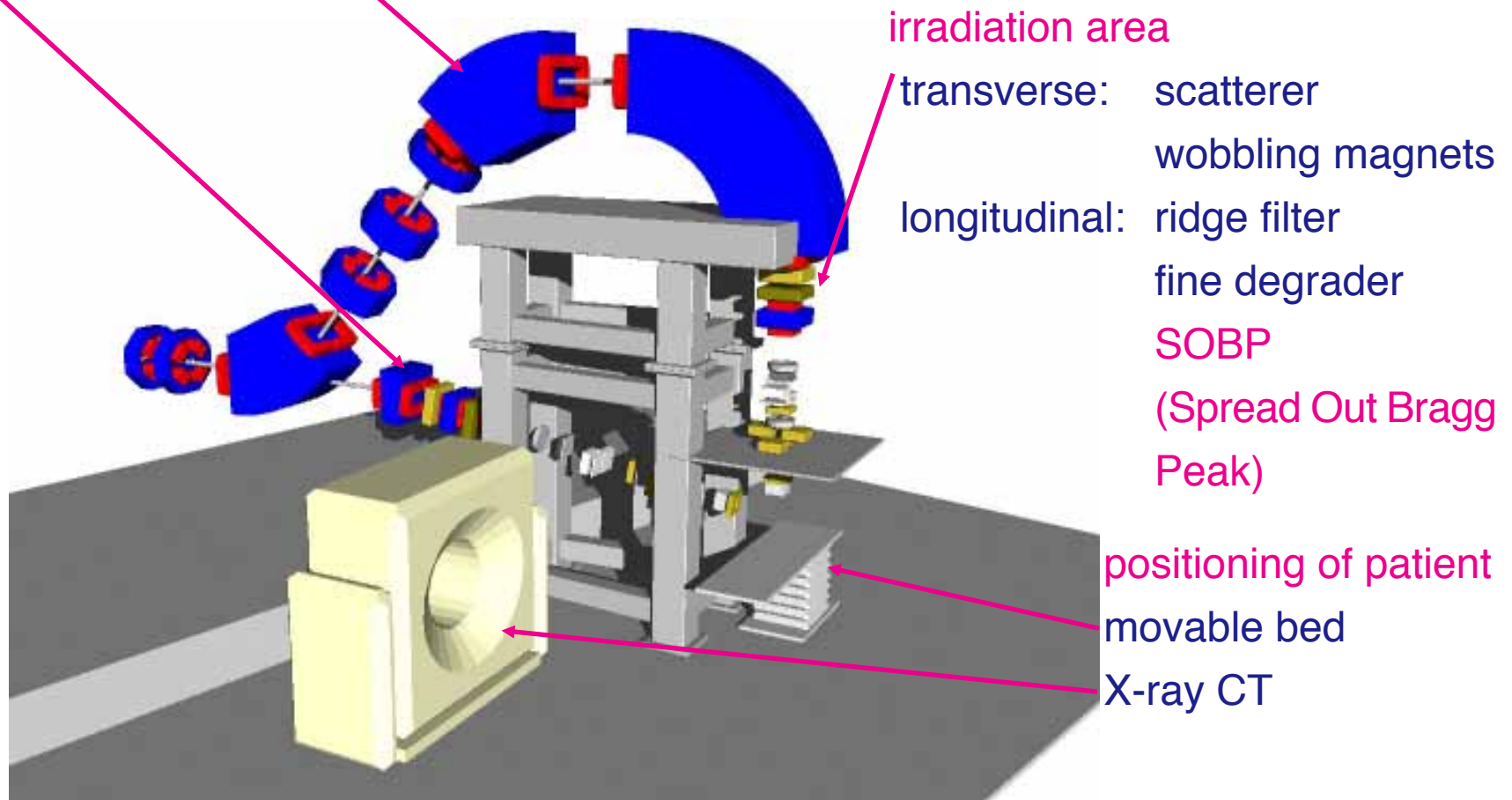
Irradiation room 3

medical use

horizontal (9.5 °) and vertical nozzles

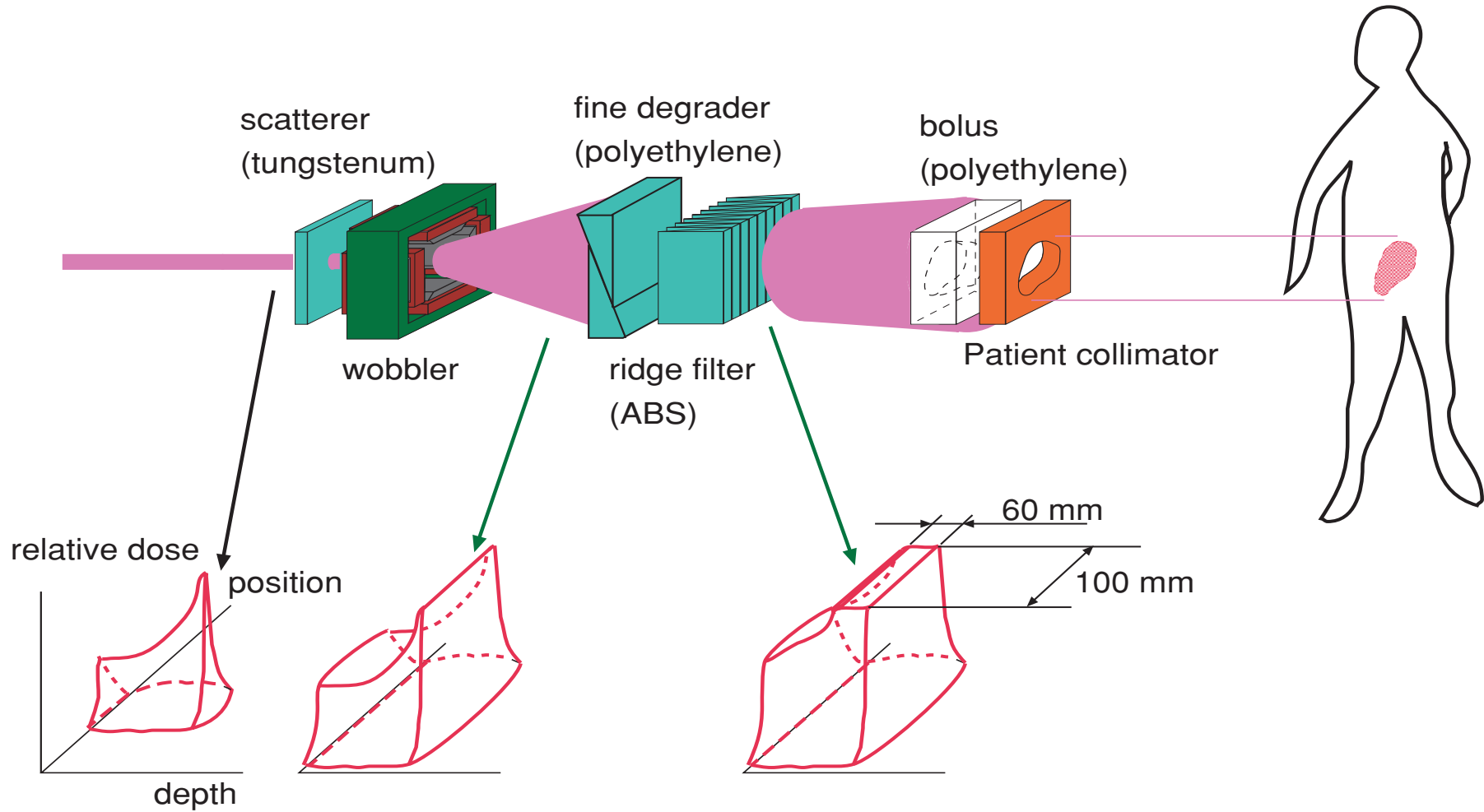
Irradiation room 4

irradiation to industrial and biological material
development of medical irradiation

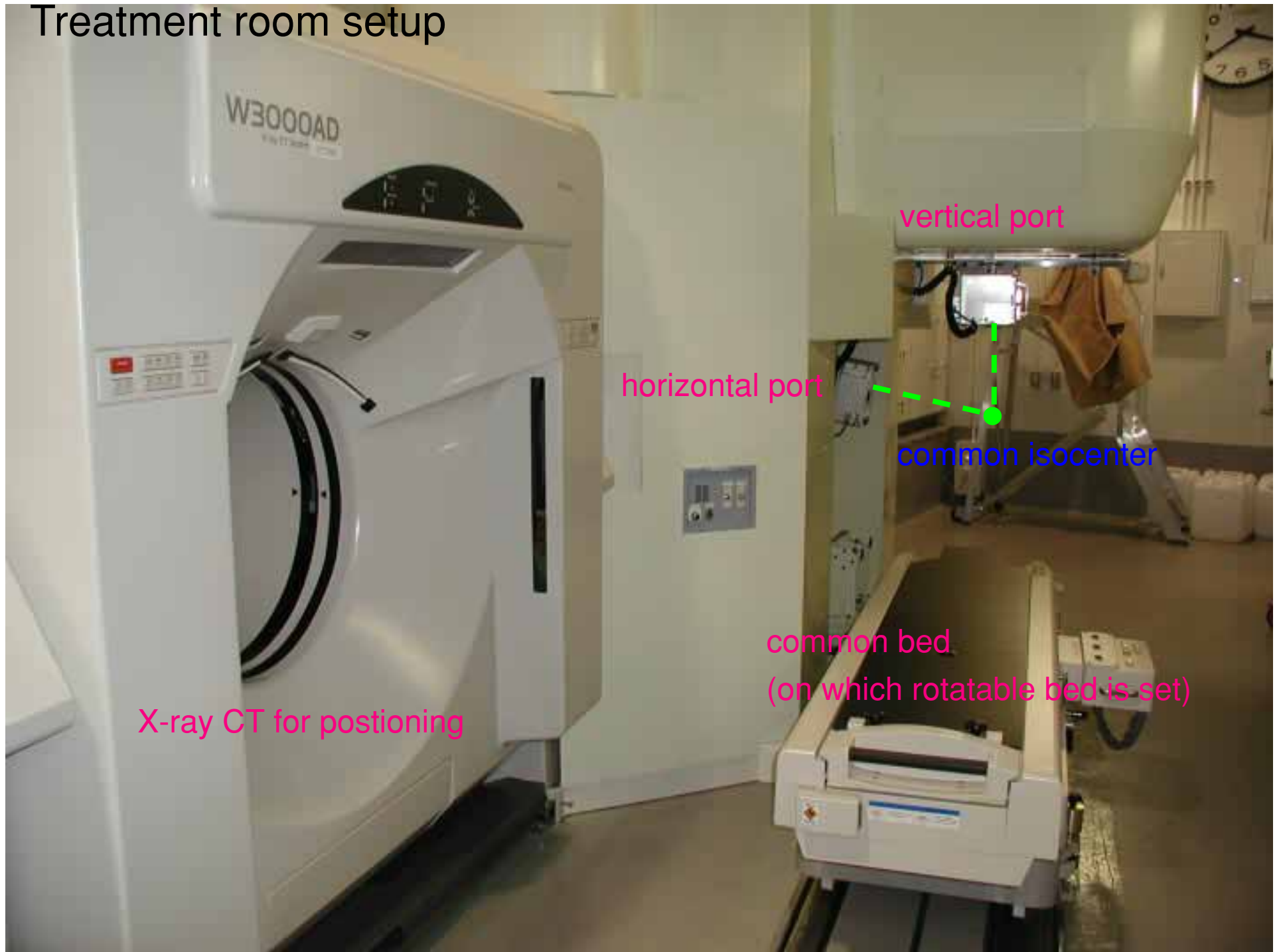


医療照射

Irradiation field



Treatment room setup



Optical element for irradiation field and Monitor for beam control



wobblers and scatterer



profile and dose monitors



ridge filter



bolus



collimator



therapy control room

Positioning of diseased part



Position observation of diseased part by X-CT



Patient on the bed is moved to the isocenter



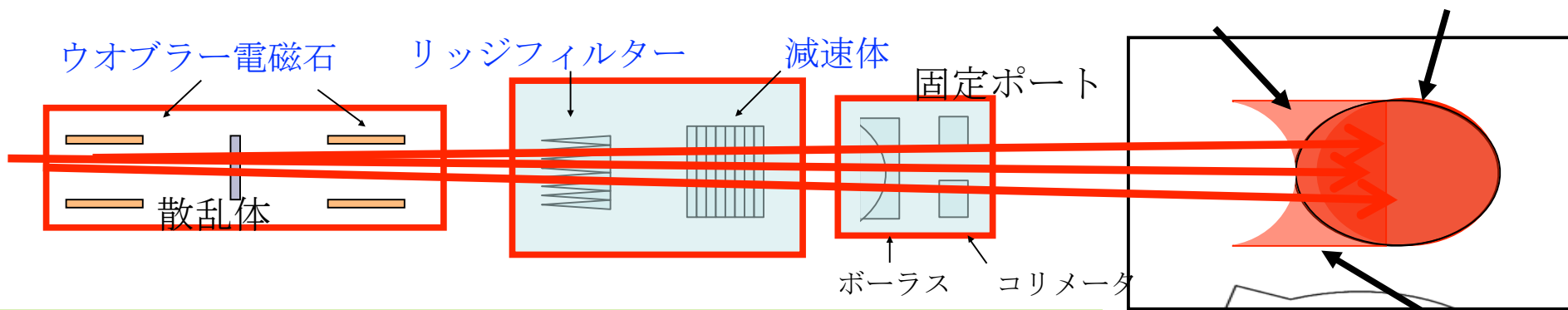
Settlement at isocenter

1. Observation by X-ray CT
 2. Move patient to irradiation position
(relative position between CT and isocenter has been measured precisely)
 3. Verification of position by image intensifier (DR)
- Positioning is done within **accuracy of 1 mm**

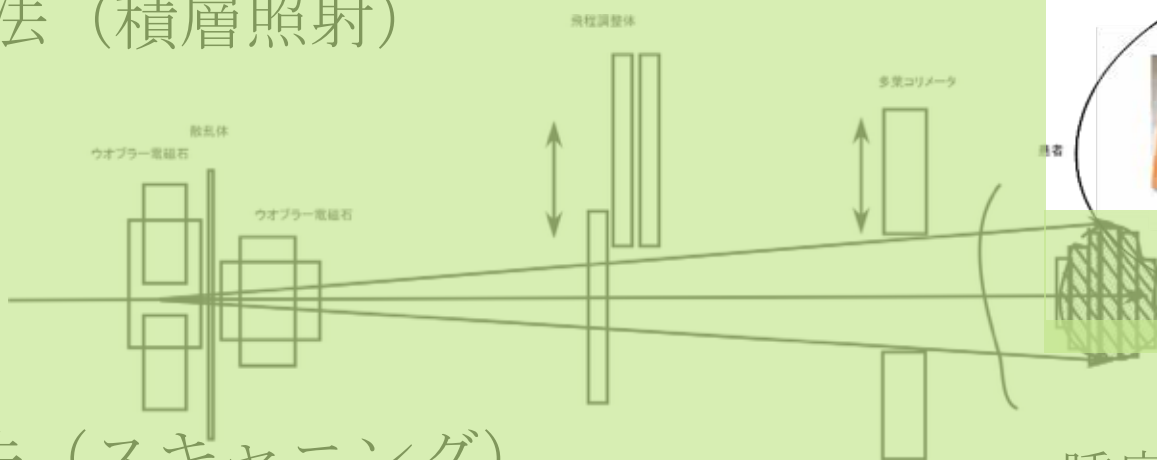
Fiscal Year	Prostate	Liver	Lung
2002	6		
2003	7	1	
2004	8	1	
2005	7		
2006	7	1	1
2007	8	2	
2008	6	1	
2009	6		

陽子線照射法各種 大気中でのビーム加工

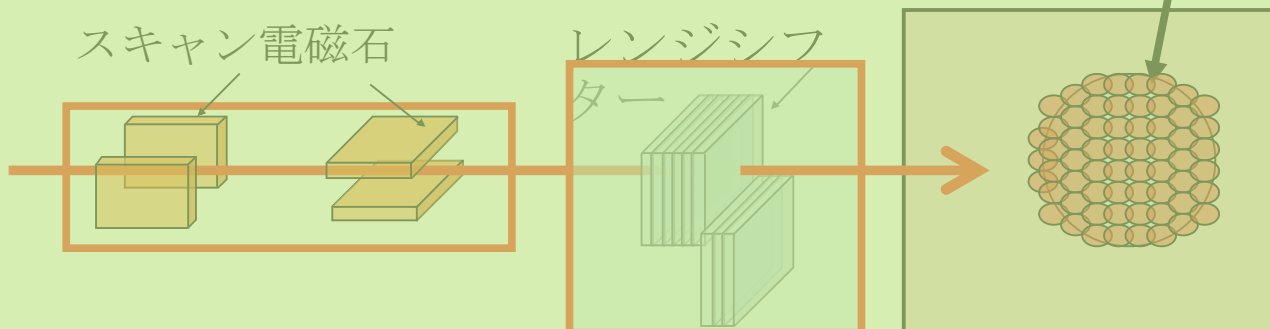
従来照射法 (ブロードビーム)



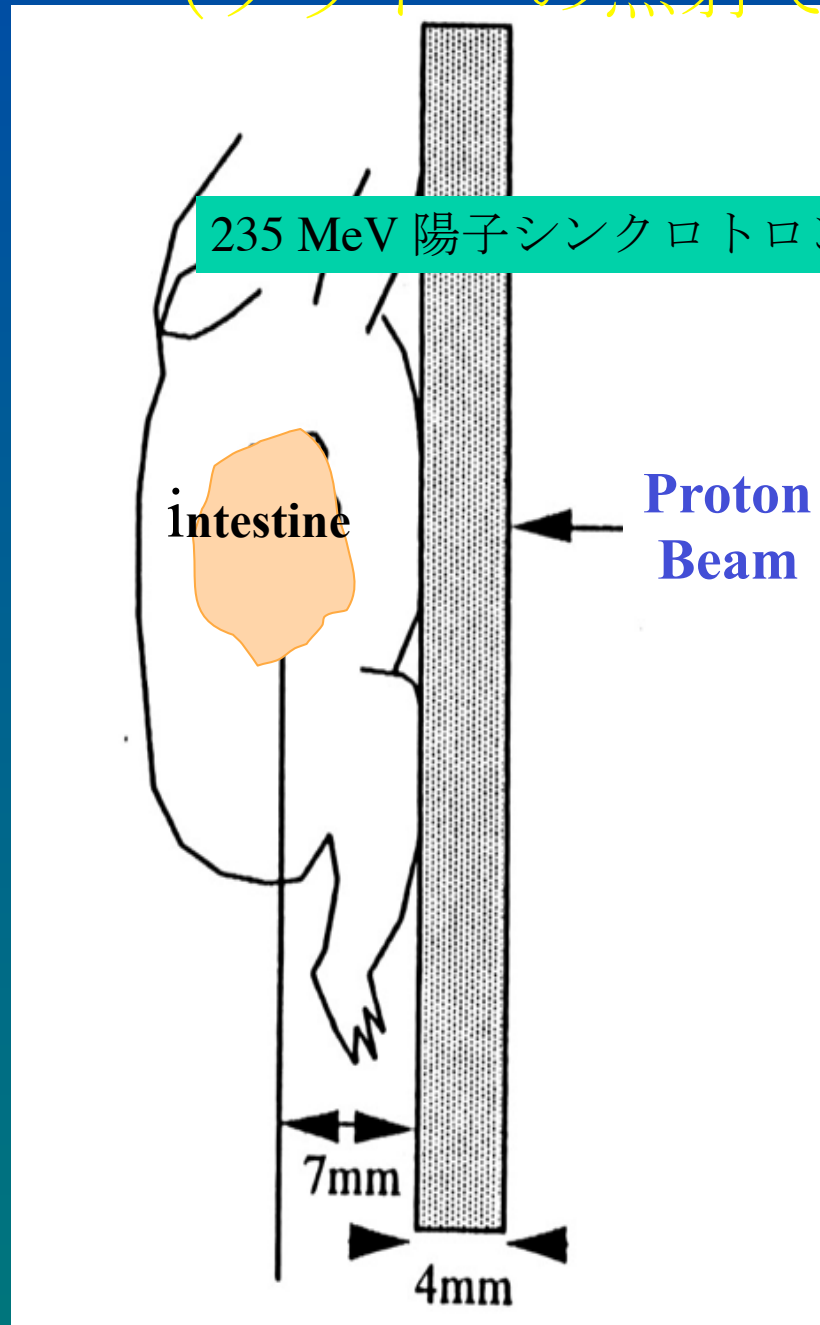
高度照射法 (積層照射)



高度照射法 (スキャニング)



臨床研究 (ラットへの照射で生物学的効果を確認)

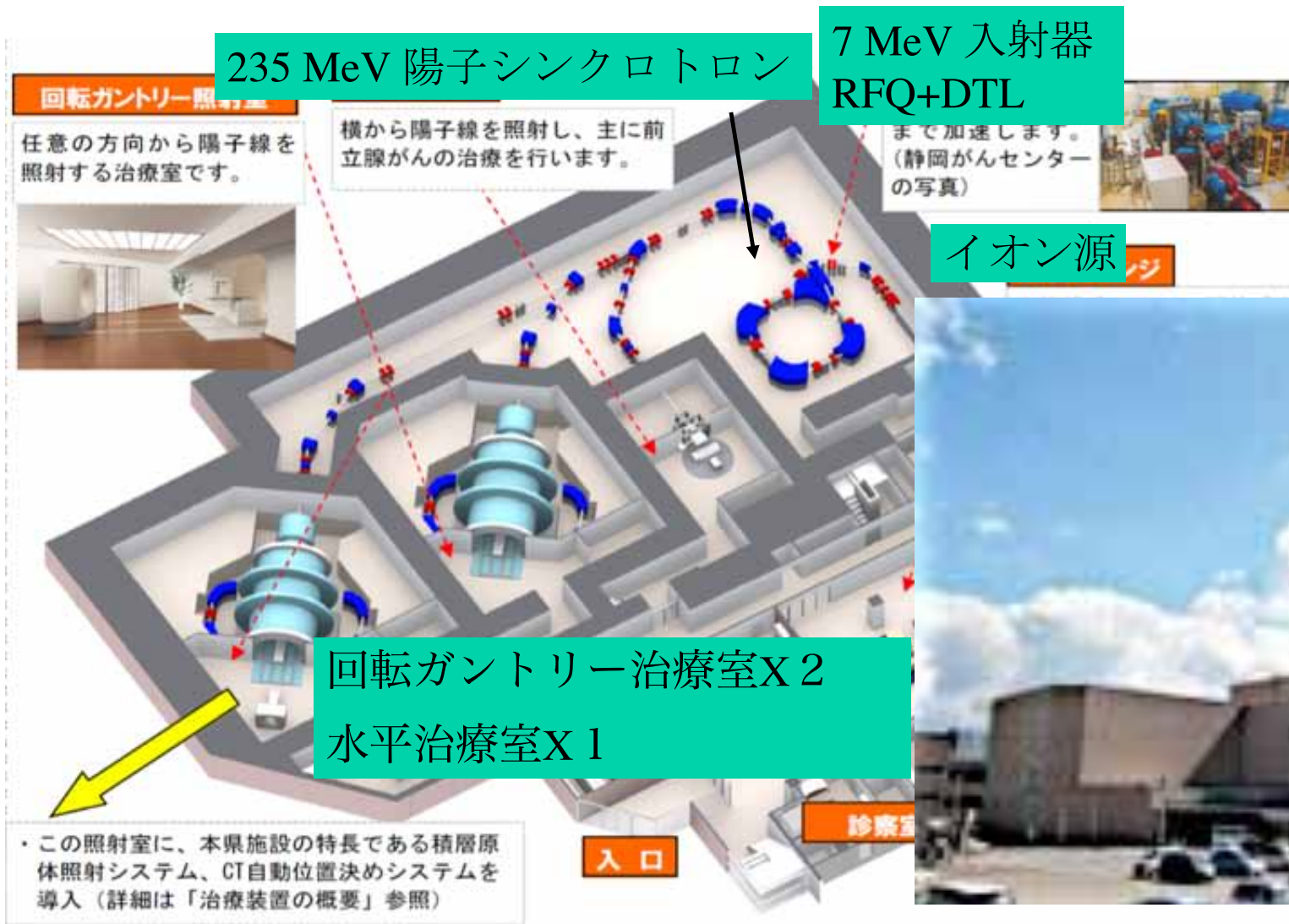


2, Installation of a laboratory for in vivo experiments and a preparation of an experiment protocol



1 floor distance from accelerator

福井県陽子線治療センター 運転開始 H23

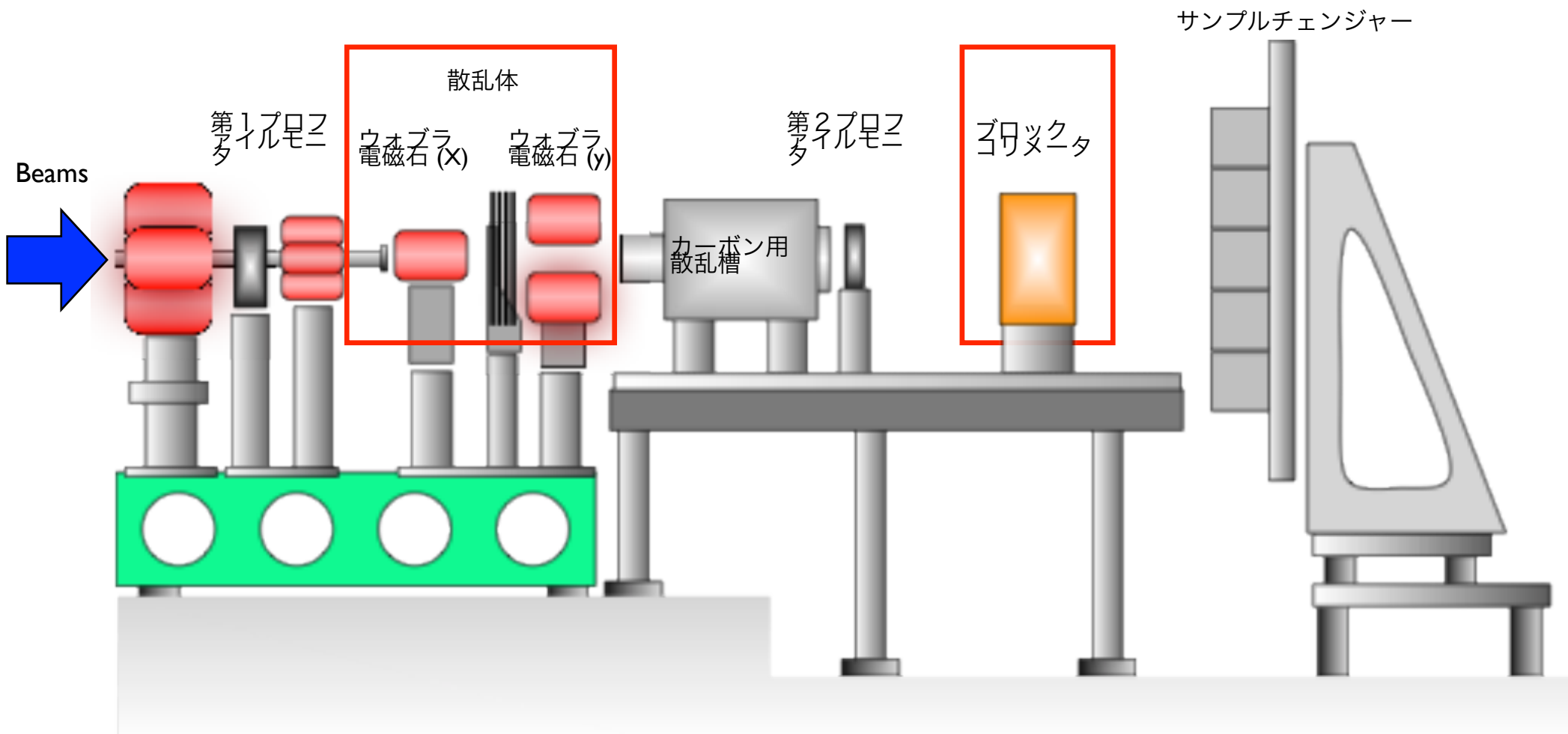


育種目的で使用出来る加速器



エネ研は、現在西日本で唯一の育種目的に使用可能なイオンビーム照射施設である。

生物照射コース(水平・高エネルギー)



ウォブラーマグネットと散乱体でビームを拡大し、
コリメータを使って整形する

イオンビーム育種



改良ペチュニア
(葉に明るい緑取り)



改良ビンカ (ニチシメ)
(花にピンク色の筋)



改良ネメシア
(葉に明るい緑取り)



改良トマト (甘み高、
コルク質少、病気に強い)



改良エダマメ
(粒径が大きい)



従来種 改良種



従来種 改良種



従来種 改良種



従来種 改良種



従来種 改良種

品種登録

品種登録： 5 (ペチュニア 1、ビンカ 3、コリウス 1)

品種登録申請： 3 (ビンカ 2)

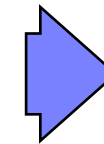
(いずれも愛知県の種苗会社と共同
出願)

その他

自家不和合性ソバ(福井県農試)、矮性コシヒカリ(福井県立大)、優良単為結果性トマト(企業)、大粒径大豆(企業)



元品種 せと福
CAMR



陽子線



左：新品種 せと福CAP
右：既存品種 (ストロベリービttes)



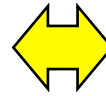
炭素線



左：新品種 せと福CAMRM
右：既存品種 (せと福CAMR)

微生物

微生物利用の物質生産では突然変異育種は一般的



代謝産物の生産性向上などとは相性が良い

- ・ 冬虫夏草 (*Cordyceps militaris*)のコルジセピン生産向上 (福井大、エネ研)
- ・ *Paenibacillus* spp. FPU-7のN-acetyl-glucosamine 生産効率向上 (福井県立大、エネ研)

動物培養細胞

遺伝子組換えのハードルが低い動物培養細胞では、細胞の付随機能改変に適用可能

- ・ CHO-DP12 の増殖制御株 (福井大、エネ研)

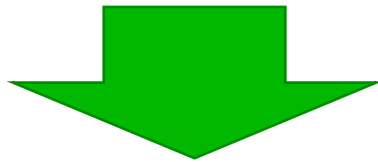
薬剤生産用の培養細胞は、無制限に増殖する性質があり、培地成分の枯渇や老廃物蓄積のため生産を長期維持することができない



過密状態になる前に増殖が抑制され薬剤の生産を継続できる培養細胞を開発

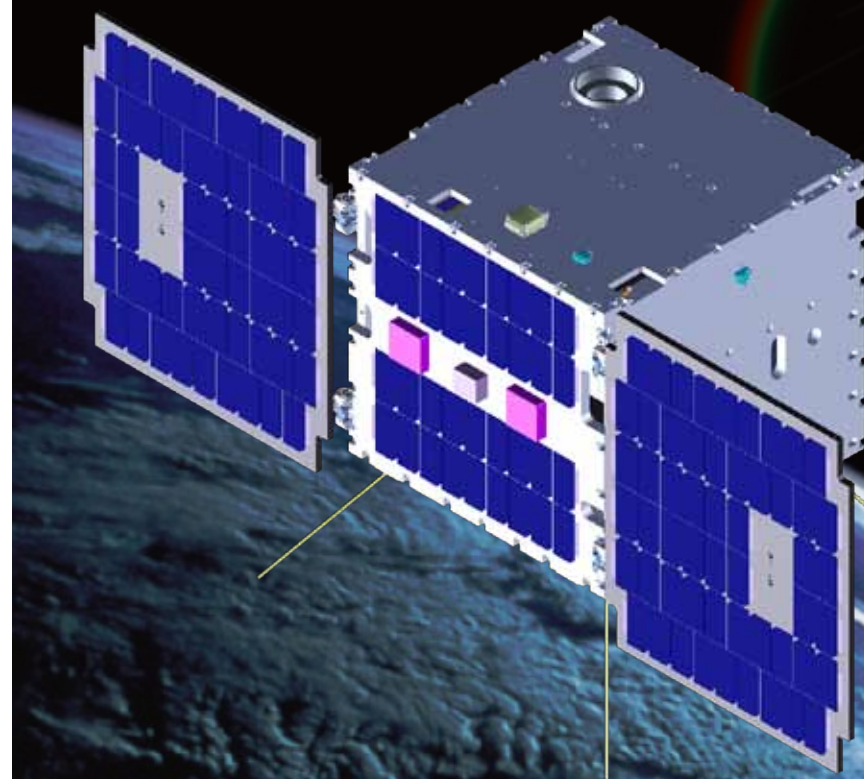
イオンビームによる生じる突然変異

- 変異率が高い。
- 変異スペクトラムが広い。
- 大規模な変異 (大規模欠失、逆位、転座など)が生じやすい。
- 付随変異が少ない。



背景原理が不明

金沢大学衛星 Kanazawa-SAT³ 重力波対応天体の発見による 重力波天文学の創成

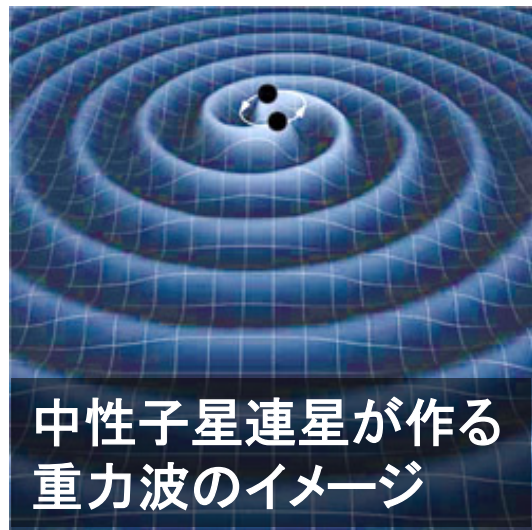


- ◆金沢大学
米徳大輔、八木谷聡、笠原禎也、
井町智彦、尾崎光紀、後藤由貴、藤本龍一
- ◆理化学研究所
三原建弘
- ◆若狭湾エネルギー研究センター
羽鳥聡、久米恭、長谷川崇、水嶋慧

© Daisuke YONETOKU
(Kanazawa Univ.)

重力波放出源としての突発天体監視

2018年頃から本格稼動する重力波観測と連携し、「重力波の発見」を超えた「**重力波天文学の創成**」を目指す



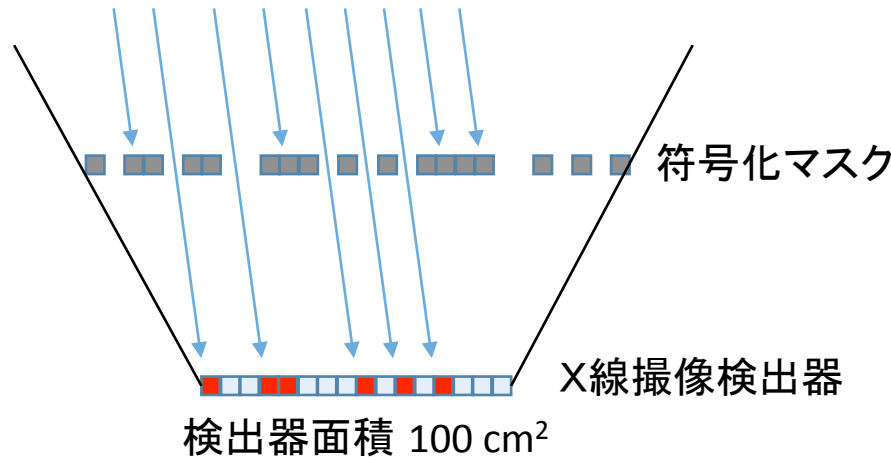
重力波の方向決定精度: 約100平方度

- ・ 発生天体や母銀河の同定には電磁波との共同観測が必須
- ・ X線は突発天体を発見・同定するのに優れている

小規模な実験であっても世界に先駆けて実施する価値のある研究

金沢大学・理化学研究所・若狭湾エネルギー研究センターが共同で2018~19年の打ち上げを目指して超小型衛星と科学観測装置を開発する

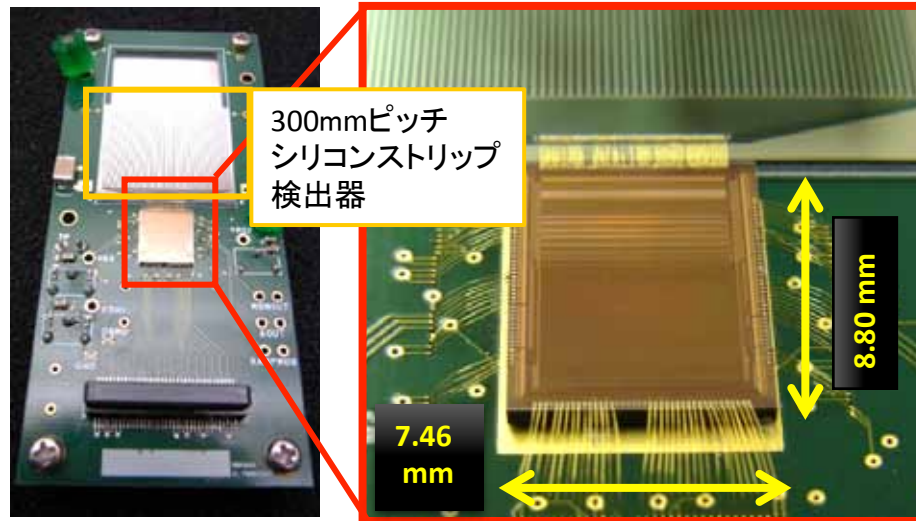
広視野X線撮像検出器の概略



- ◆ X線の陰影を撮影し、パターンマッチング
 - ◆ 全天の 1/6 におよぶ広視野をモニターし重力波と同期したX線突発天体を発見
- 超小型衛星に搭載可能ではあるが、10 キロ電子ボルト以下で過去最高感度の検出器を開発する

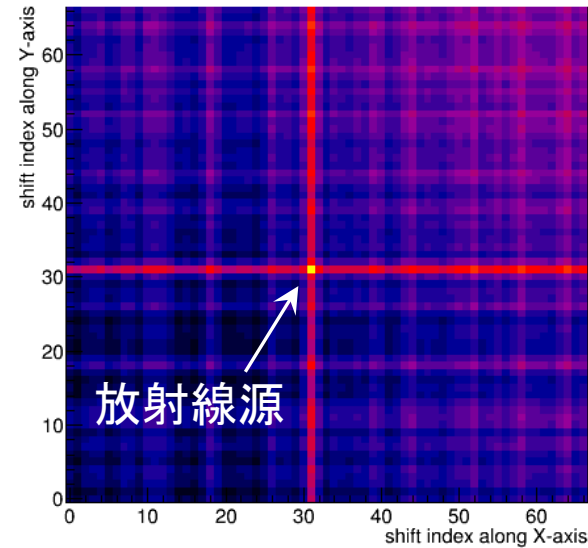
※ 1次元センサーを直交させてイメージを取得したため十字になる

検出器試作モデル



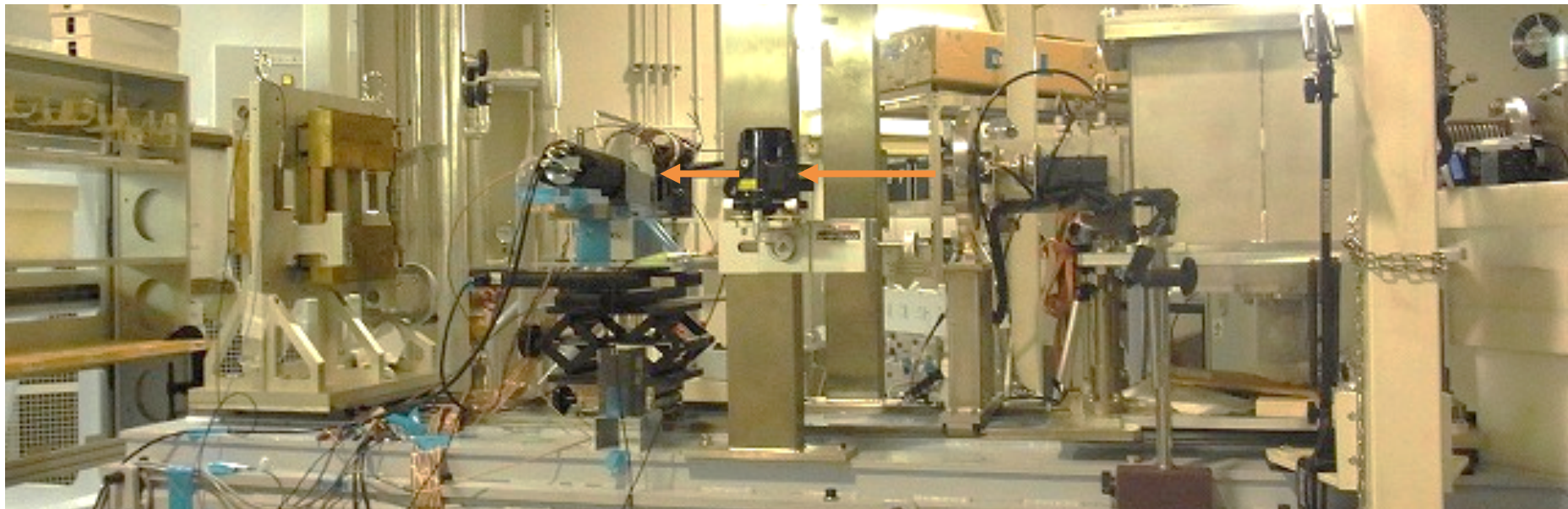
X線撮像検出器

アナログ集積回路部



X線源の撮像実証

プロトン／炭素イオンビーム照射による放射線耐性試験



- 2013/10/03 – 04 : **シリコンストリップ検出器に対するプロトン照射** (200 MeV 単色) 試験
軌道上 10 年分相当のプロトン数において放射化レベルは無視できる
リーク電流の経年変化を測定 (約 4 倍になるが検出器性能に影響無し)
- 2014/06/12 – 13 : **ASIC に対するプロトン照射試験**
軌道上10年分の照射でも機能維持を確認
シングルイベントアップセット・ラッチアップ(SEU/SEL)は発生しない
- 2015/02/04 – 06 : **炭素イオン 200 MeV → 約 10 MeV に減衰させ ASICへ照射**
軌道上 10万年分相当の炭素イオンで SEU が 発生
軌道上 100万年分相当で機能損失

ミッション想定期間の 3 年程度では、シリコン検出器+ ASIC は問題無く動作することを実証

◆ 金沢大学衛星に搭載する機器に対する放射線耐性試験を実施

◆ プロトン照射試験 200 MeV

軌道上 10年分相当の照射において、

- ・ シリコンストリップ検出器の放射化、リーク電流の変化を測定 → 観測に影響無し
- ・ ASIC のゲイン、ノイズレベルは全く変化しないことを確認

◆ 炭素イオン照射試験 200 MeV → 空気中の減衰により約 10 MeV

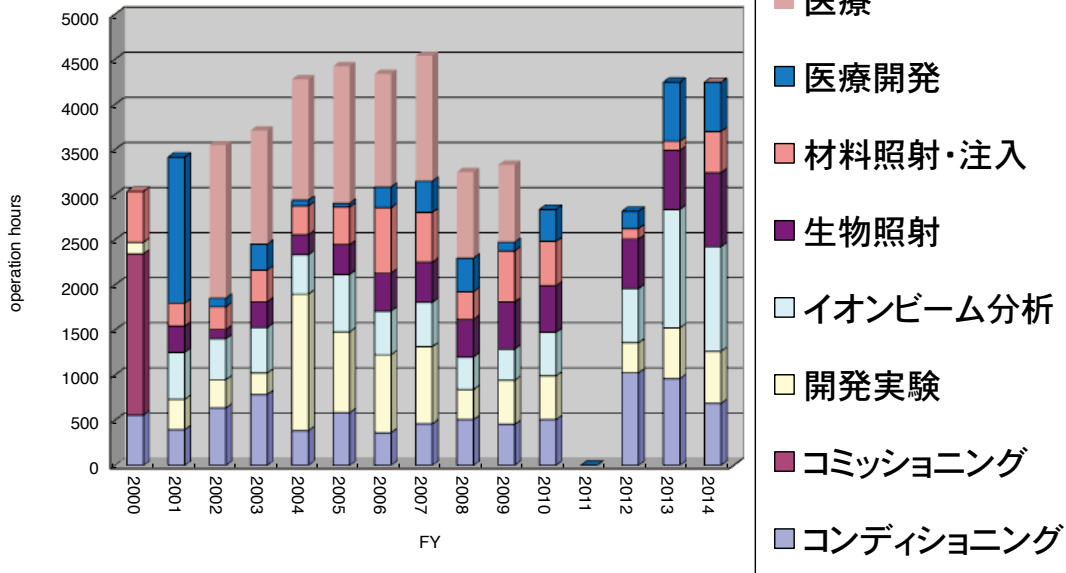
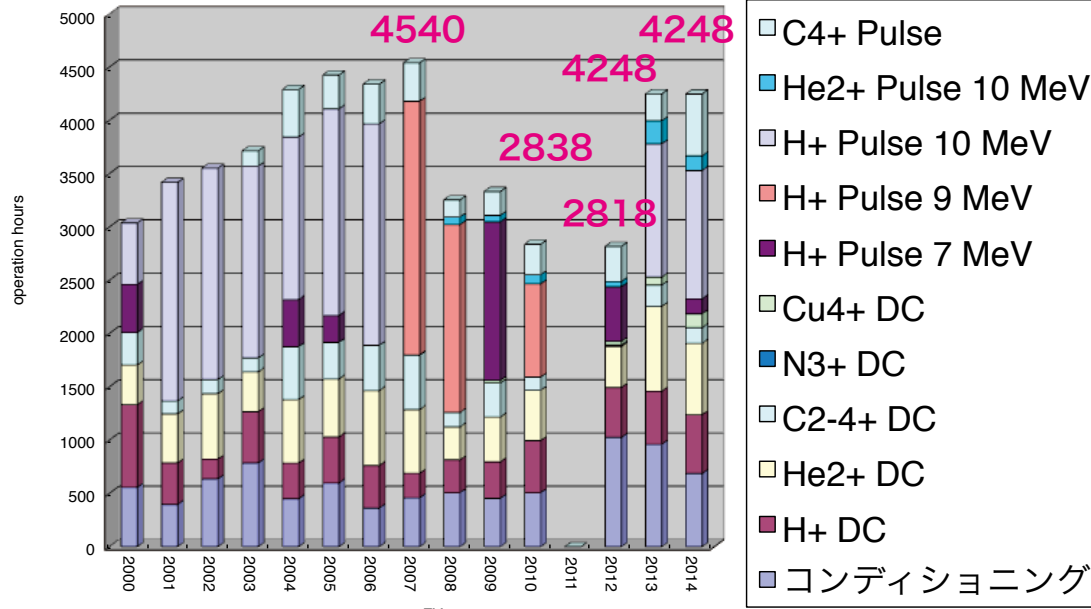
- ・ ASIC に入射する直前の炭素イオンエネルギーが約 10 MeV になるよう調整 (Linear Energy Transfer が数 MeV cm²/mg となるように調整)
- ・ 衛星軌道上の炭素イオン量に換算して
10万年程度に1回の頻度で SEU が発生
SEUの断面積は 2.2×10^{-12} cm²/carbon/chip 程度
100万年程度の照射でも SEL は発生しない

ミッション想定期間の 3 年程度では、シリコン検出器 + ASIC は問題いことを実証

今後は FPGA/CPU 系の周辺回路や、DC-DCコンバータ(電源)、高圧電源等に対しても放射線耐性試験を実施する

5. これまでのまとめ、これから。

加速器運転時間



2010 年度

医療照射終了後のマシンタイム
絶縁コラム放電痕除去により 6 月に
マシンタイムスタート
絶縁コラム交換作業のため 12 月に
マシンタイム終了

2012 年度

絶縁コラム交換および
加速管修理、再インストールのため
7月にマシンタイム再開
5 MV 運転はできず。4 MV で。

2013 年度

5 MV 運転復活
マシンタイムも復旧

2014 年度

5 MV 運転するも放電。12 月以降は
4 MV 運転。
定検を一月遅らせ 2015.3 月～ 4 月
で行う。

医療照射が終って6年。

すべての実験においてタンデム加速器の健全な運転が重要である。

イオンビーム分析、生物照射、医療照射基礎研究に加え、耐放射線性評価に関する要求が増えつつある。この加速器を支えるチームはわずか11人、そして、エネ研内のユーザーもわずか。

逆に、外部の人たちの実験条件にも相談可。

使い勝手のよい加速器施設を作っていきたい。