

新規医療イノベーションのためのシンポジウム

RI製造用高強度小型加速器の 設計検討

大阪大学 核物理研究センター (RCNP)

福田 光宏

Contents

1. RCNPサイクロトロン施設の概要
2. RCNPにおける医・理・核物連携の現状
3. RI製造用小型加速器開発の目的
4. 高強度小型高温超伝導サイクロトロンの設計検討の状況
5. まとめ



1. RCNPサイクロトロン施設の概要

核物理研究センターの歩み

- 1971年 核物理研究センター発足
- 1973年 AVFサイクロトロン完成 (~41歳!!)
- 1976年 共同利用実験開始
- 1991年 リングサイクロトロン完成
- 2000年 SPring-8 レーザー電子光実験施設 (LEPS) 完成

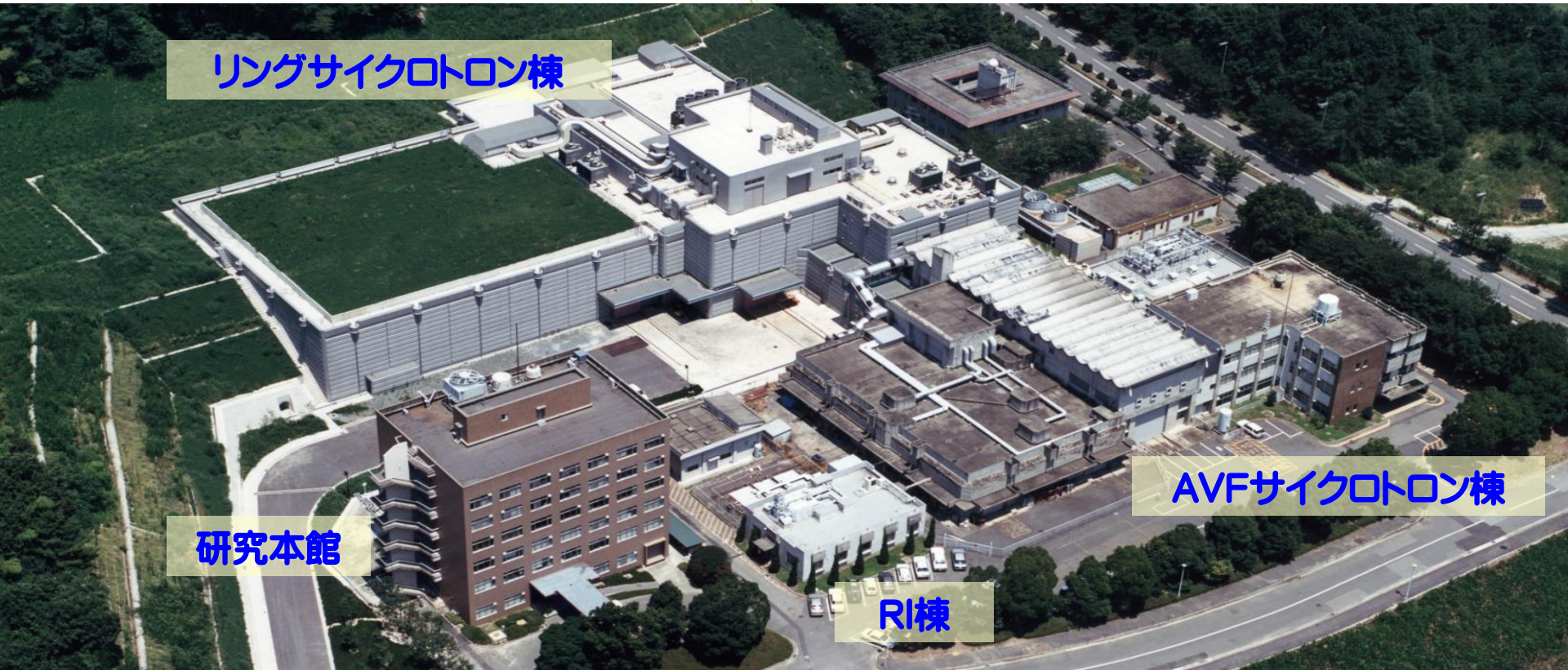
全国共同利用
研究施設

リングサイクロトロン棟

研究本館

RI棟

AVFサイクロトロン棟



RCNPサイクロトロン施設



RI Beam
原子核物理

超冷中性子源
基礎科学

Ring Cyclotron
K=400 MeV, Since 1992

準単色中性子
核データ

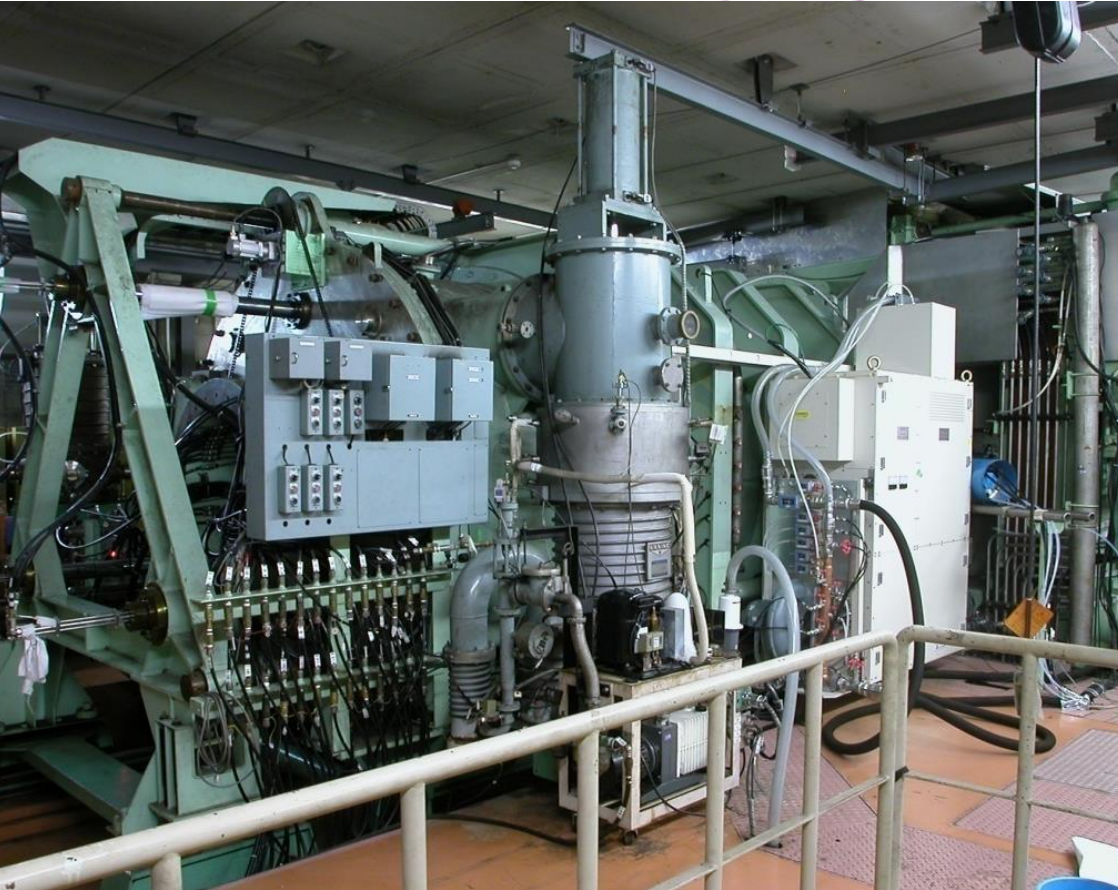
Grand Raiden
精密核物理

MuSIC
ミューオン科学

白色中性子
半導体ソフト
エラー試験

AVF Cyclotron
K=140 MeV, Since 1973

AVFサイクロトロン(K140)



1973年 完成

1991年以降

単独利用とリングサイクロトロン
の入射器としての利用

- ・加速イオン
陽子、重陽子、ヘリウム、リチウム、炭素、酸素、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノンなど

- ・加速エネルギー
陽子 10~80MeV
(光速の40%)

He 4~140MeV

重イオン 1~35MeV/核子

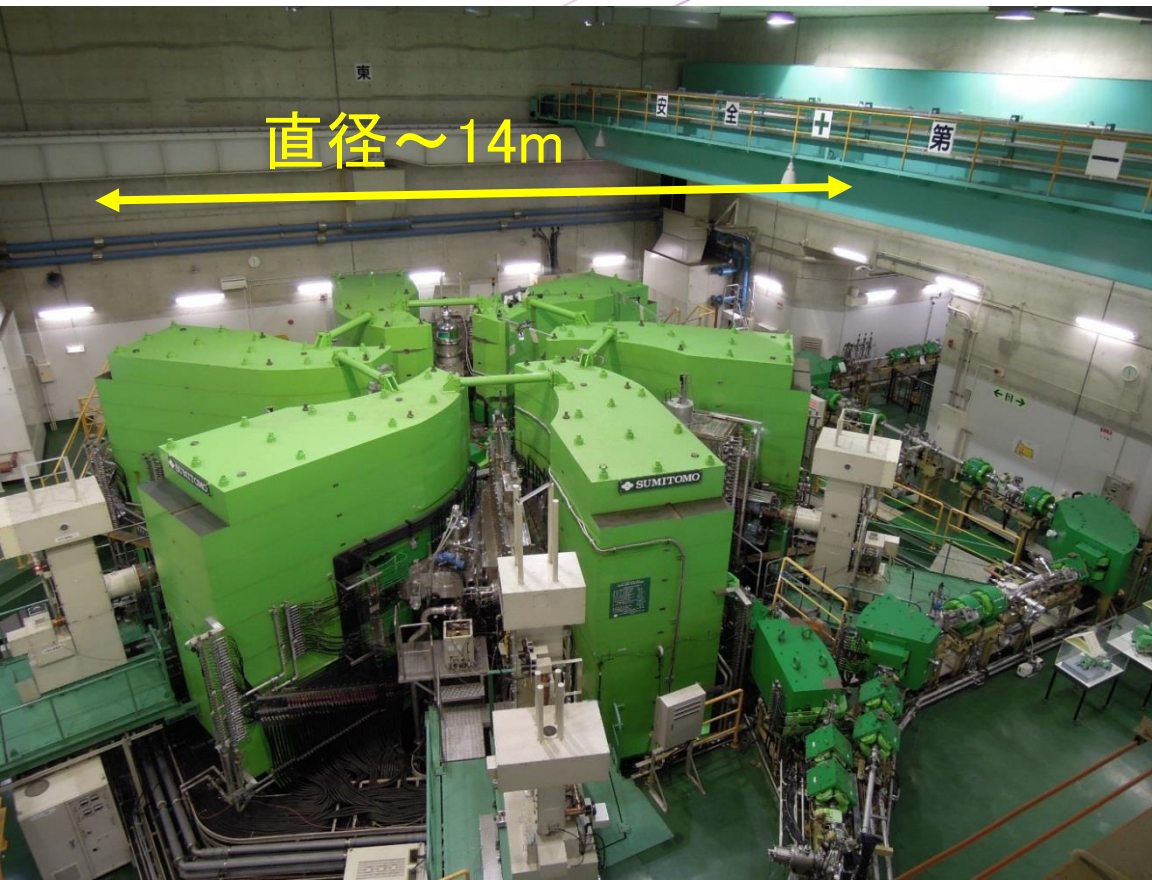
- ・利用形態
単独利用:核化学・核医学用RI生成、教育用原子核実験など

入射器: リングサイクロトロンの前段加速

| 粒子 | エネルギー | 許可ビーム電流値 |
|------|------------------------------|----------|
| 陽子 | $E \leq 66 \text{ MeV}$ | 6.0 pμA |
| | $66 < E \leq 90 \text{ MeV}$ | 3.0 pμA |
| 重陽子 | $E \leq 57 \text{ MeV}$ | 6.0 pμA |
| | $57 < E \leq 75 \text{ MeV}$ | 3.0 pμA |
| He-4 | 140 MeV | 6.0 pμA |

リングサイクロトロン(K400)

1991年 完成

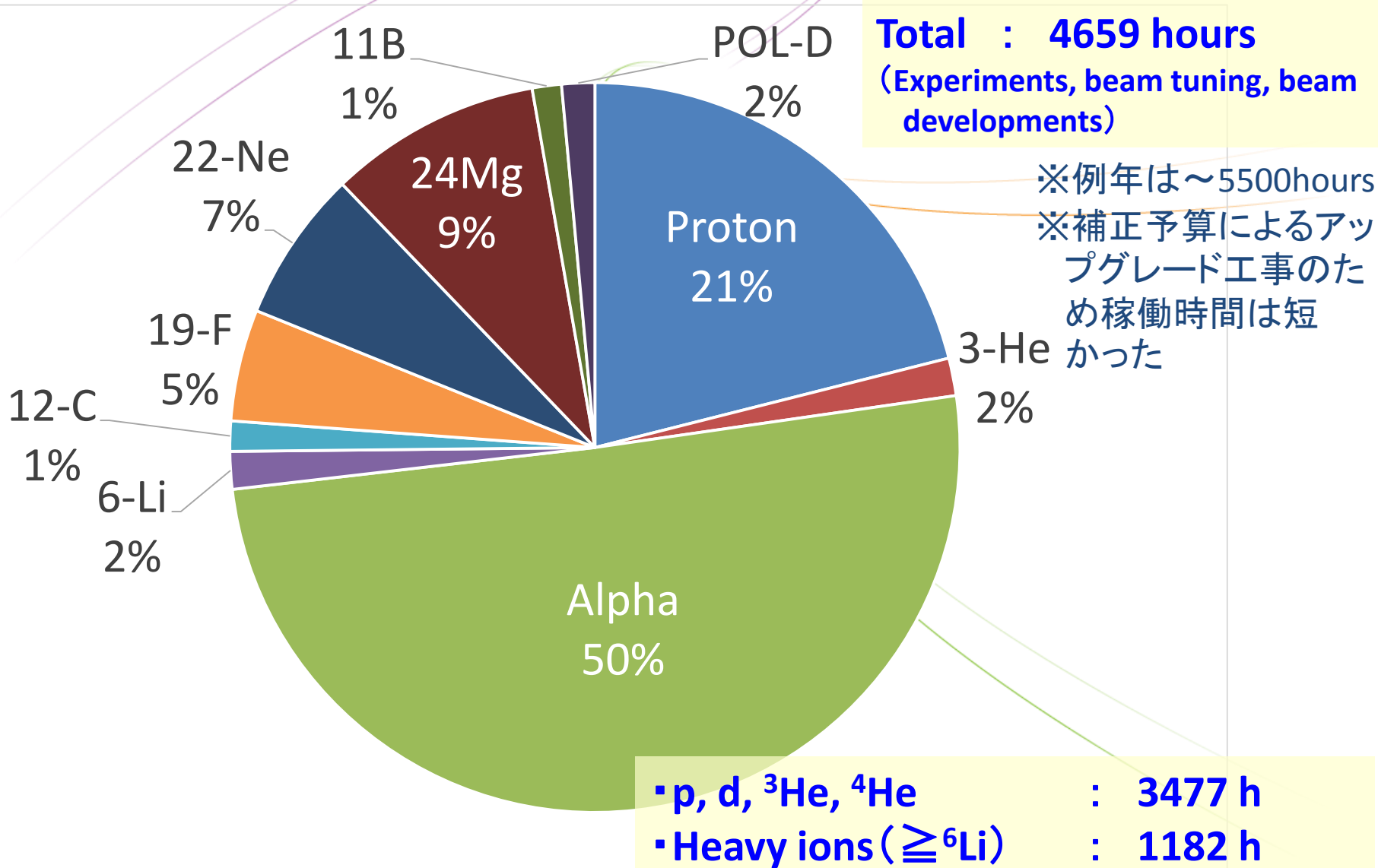


直径～14m

- ・加速イオン
陽子、重陽子、ヘリウム、リチウム、炭素、酸素、ネオン、アルゴン等の様々なイオン
- ・加速エネルギー
陽子 : 100～400MeV
He : 120～400MeV
重イオン: 30～100 MeV/核子
- ・性能【世界最高レベル】
エネルギー幅: 0.01%以下
(フラットトップ加速)
磁場の安定性: 0.001%以下
(電磁石コイル冷却水温度制御)

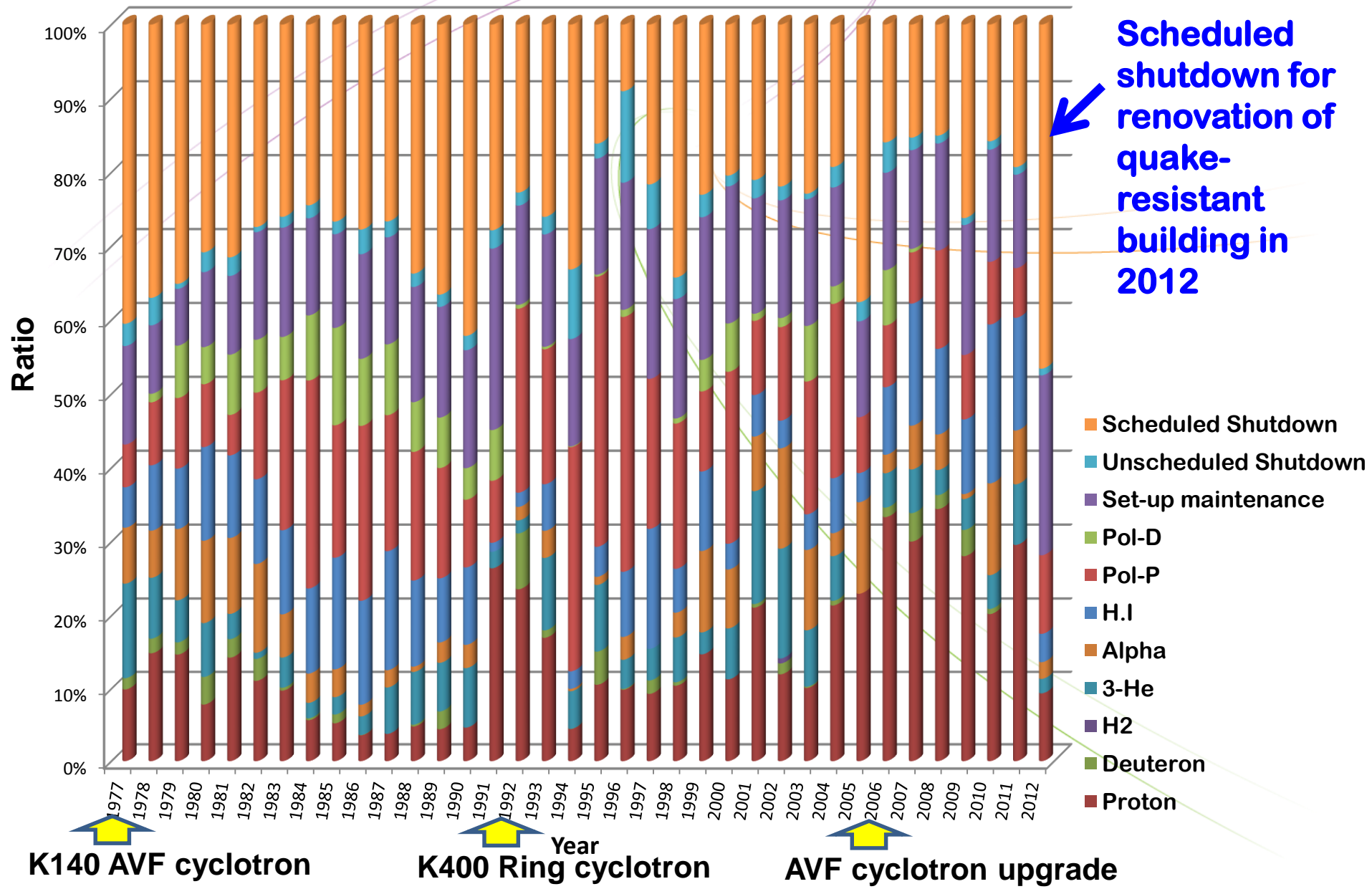
| 粒子 | エネルギー | 許可ビーム電流値 |
|------|-----------|---------------|
| 陽子 | 440 MeV | 1.1 p μ A |
| 重陽子 | 220MeV | 1.1 p μ A |
| He-4 | 440 MeV | 1.1 p μ A |
| 重イオン | 110 MeV/n | 1.1 p μ A |

サイクロトロン年間運転時間: JFY2013



Annual Operation Time from 1977 to 2012

~ 5500 hours/year in average





2. RCNPIにおける 医・理・核物連携の現状

大阪大学 医・理・核物連携事業

加速器科学
原子核物理
放射線物理
などをベースにした医学・医療
応用

医学系研究科



強度変調放射線治療
MV-CBCT
腫瘍の位置誤差、変動の把握
正常組織の線量低減
治療計画プロトコルの最適化

放射線治療



PET・SPECT検査

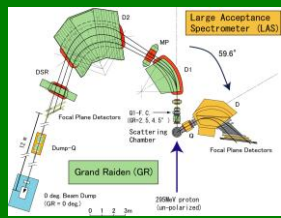
加速器を活用した高度な教育による医学物理士等の人材育成

- ・重粒子線用ガントリー
- ・次世代BNCT装置
- ・加速器の小型化・高強度化


- ・診断技術
- ・核データ

RI分離・合成

核物理研究センター



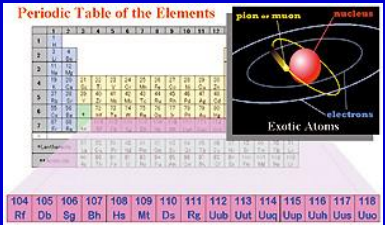
原子核物理



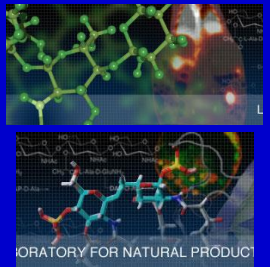
加速器

RI生成

理学研究科



核化学



有機化学

RI生成専攻との連携

●RI生成専用ビームライン整備に至る経緯

①AVFサイクロトロン更新(2005年1~3月)

- ・RI生成専用ビームライン(Kコース)をS実験室に整備
- ・核化学照射装置の導入【篠原研】

②研究計画検討専門委員会(2006年12月25日)

- ・PETプロジェクトを報告【医学系研究科畑澤研】
新規生体機能分子プローブ I-124 の生成
F-18、C-11、I-124標識医薬品候補化合物合成

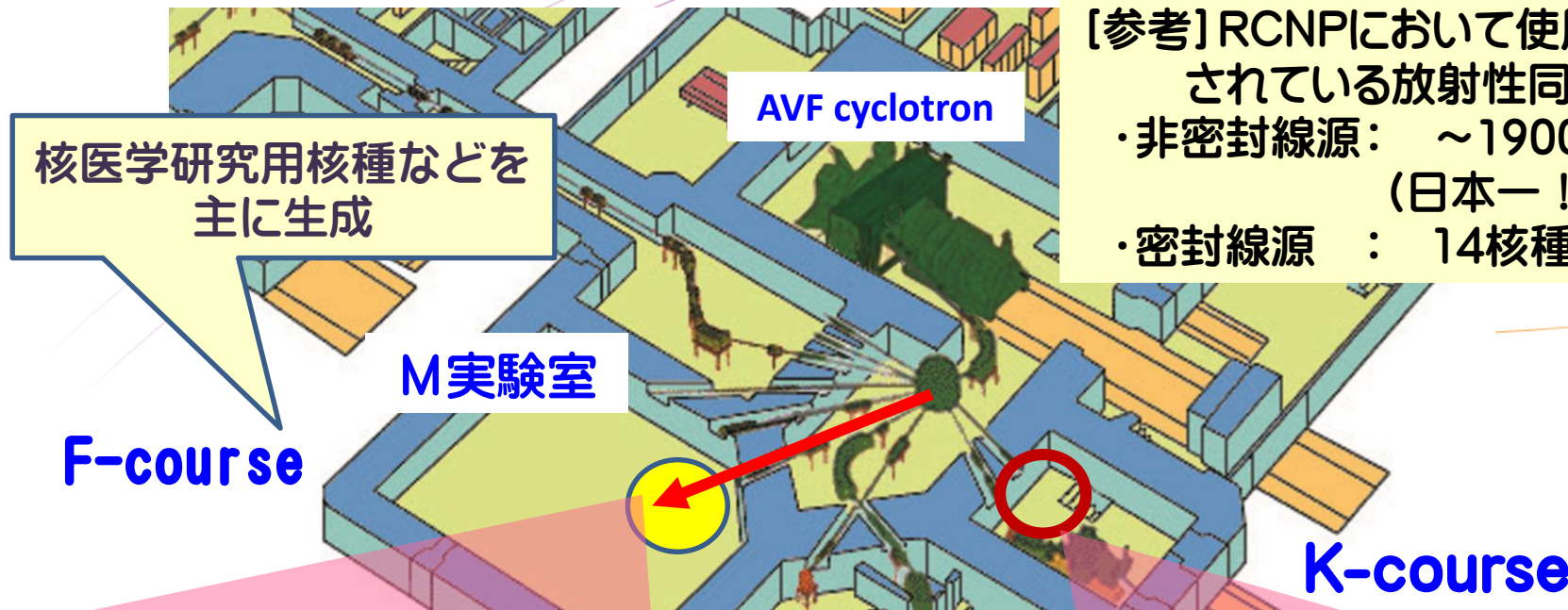
③研究計画検討専門委員会(2007年8月7日)

- ・プロジェクト「重元素化学の基盤研究」を採択【篠原研】
- ・RI生成ビームタイム ~数日/月

④核医学用RI生成ビームラインの整備(2013年)

- ・Fコース@M実験室

RI生成専用ビームラインの整備

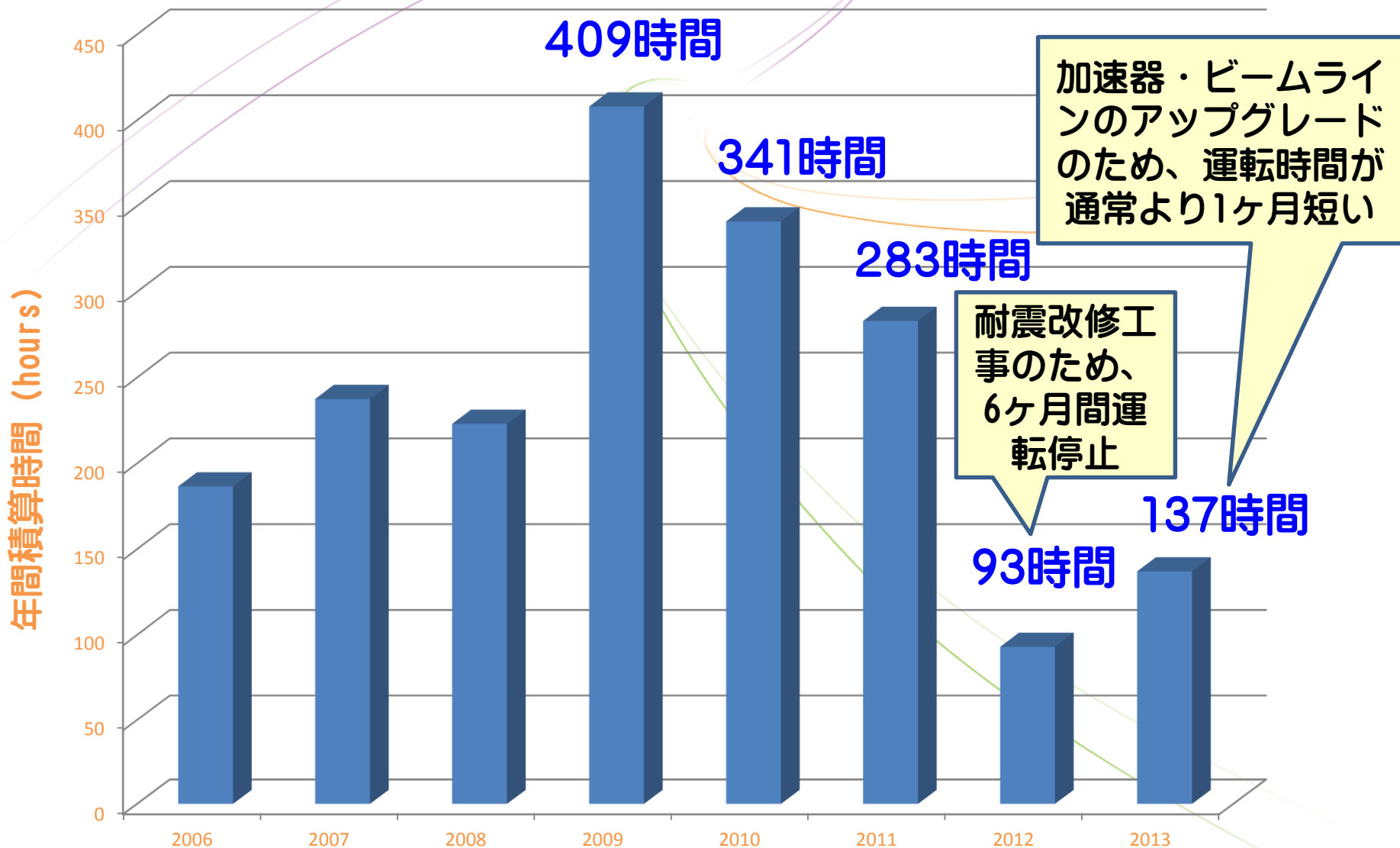


[参考]RCNPにおいて使用が許可されている放射性同位元素

- ・非密封線源： ~1900核種 (日本一!?)
- ・密封線源： 14核種 31個



年間のRI生成用ビームタイム



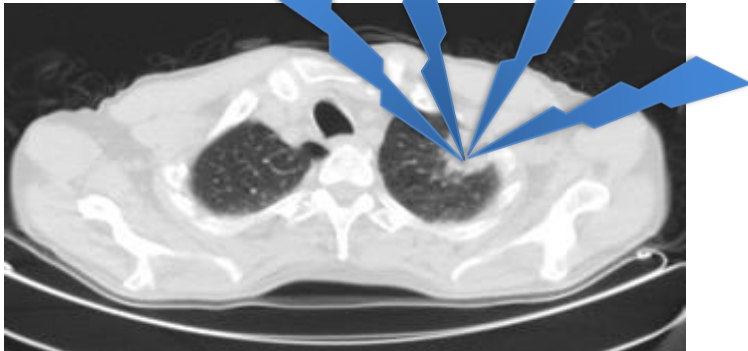


3. RI 製造用小型加速器開発の目的

アルファ線内用療法

★従来の重粒子線治療: 重粒子線加速器による体外からの照射

- ・がん病巣を照射で狙い撃ちし、正常細胞へのダメージを抑えることが可能
- ・一般の放射線が効かないがんに対しても優れた効果

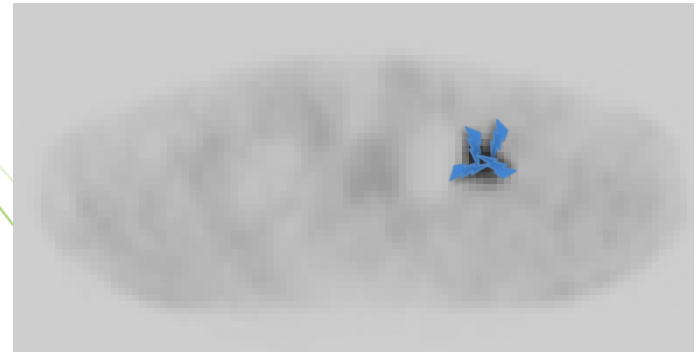


患者さんは
加速器施設
で加療



★アルファ線内用療法★ α線放出核種を投与し体内から照射

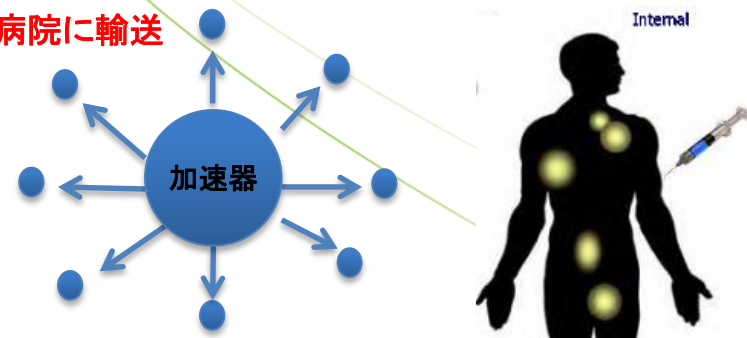
- ・高効率ターゲティングによりがん細胞だけを攻撃
- ・α線の短い飛程のため周辺臓器の侵襲がない
- ・照射による狙い撃ちの難しい初診時進行がんにも有効



※BNCTはホウ素を投与し、熱中性子を照射

核種を各病院に輸送

患者さん
は病院で
加療



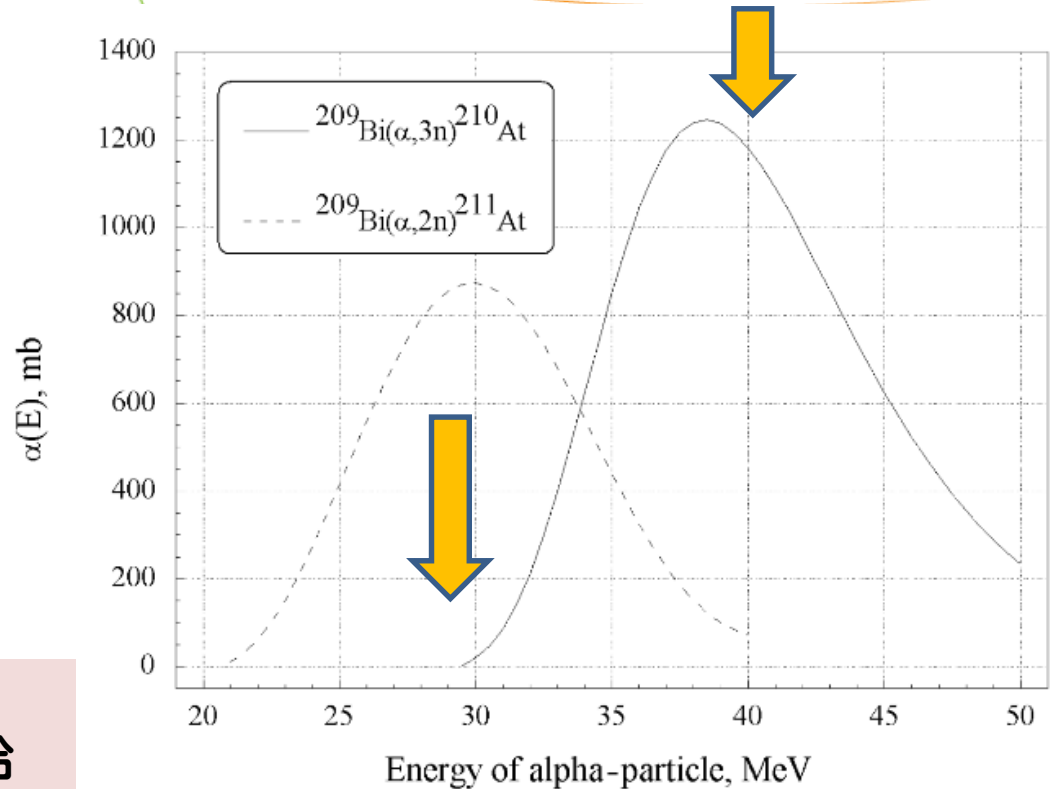
アルファ線内用療法に適した核種

α線放出核種とエネルギー

| RI | $T_{1/2}$ | E_{α} (MeV) |
|--------|-----------|-----------------------|
| Tb-149 | 4.2 h | 4.0 |
| Bi-212 | 61 min | 8.8 |
| Bi-213 | 46 min | 8.4 |
| At-211 | 7.2 h | 5.9, 7.5 |
| Ra-223 | 11.4 d | 5.8 |
| Ra-224 | 3.66 d | 5.8 |
| Ac-225 | 10 d | 5.9 |

• ^{210}At : SPECT診断用 $^4\text{He}^{2+}$ 50MeV
※ビーム電流は μA オーダーで構わない

• ^{211}At : α線内用療法用 $^4\text{He}^{+1/2+}$ 28~30MeV
※数百 μA 級の大強度 ^4He ビームを加速

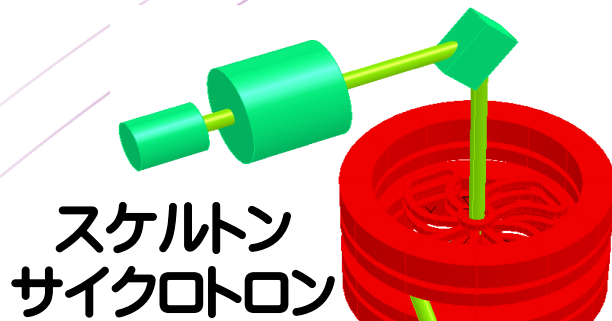


400~500 μA の28MeV $^4\text{He}^+$ ビームで数十GBqの ^{211}At を供給
(患者100名前後を治療可能)



4. 高強度小型高温超伝導サイクロトロン の設計検討の状況

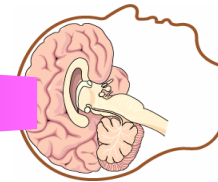
高強度小型高温超伝導スケルトン・サイクロトロン



スケルトン
サイクロトロン

次世代熱外中性子
生成・照射システム開発

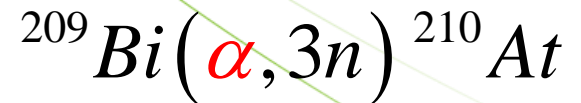
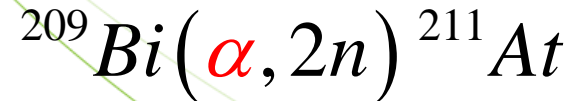
BNCT
基礎研究



大強度ビーム
 ${}^4\text{He}$ 28, 40 MeV
陽子 30 MeV
(重陽子 40 MeV)

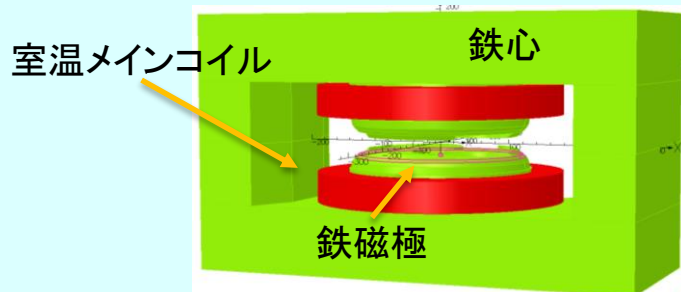
大強度ビーム
陽子 30 MeV
重粒子

核医学診断・放射線治療用
RIの大量生産
特に・・・At-211



サイクロトロン課題と解決に向けた開発

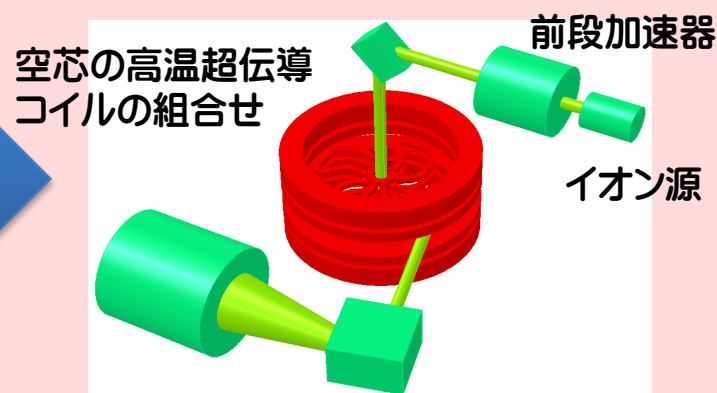
従来のAVFサイクロトロン



【課題】

- ①室温コイルと鉄心の組合せでは磁束密度に限界あり
→高エネルギー化、コンパクト化が困難
- ②コイルの発熱により鉄心温度が変化
→磁場が安定しないため、ビーム強度と質が変動
- ③ヒステリシスにより磁場が再現しない
→エネルギー変更が困難
- ④常伝導コイルは消費電力が大
→運転コストが大きい
- ⑤鉄磁極が空間的な自由度を奪っている
→機器の配置に制約あり

“スケルトン・サイクロトロン”



【解決策】

- ★高温超伝導コイルを採用
→臨界温度が高く、マージンが大
→省電力で、高磁場を発生
→磁場強度は室温に依らず安定
- ★空芯型サイクロトロン(世界初)
→磁場強度の再現性に優れ、運転が簡単
→コンパクトで省スペース、内部機器の配置が自由、ビームの高強度化が可能

スケルトン・サイクロトロンのパラメータ

- ・引出半径 : 50 cm ←コンパクト化
- ・最大平均磁場 : 3.2 (T) ←高温超伝導化
- ・K値 : 120 MeV
- ・加速ハーモニクス : 2, 4
- ・加速周波数 : 30~60 MHz

| Ion | Energy (MeV) | B _{av} (T) @50cm | B ₀ (T) @center | f _{RF} (MHz) | h | Applications |
|------------------------------------|--------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|----------|---|
| ⁴He⁺ | 28 | 3.053 | 3.030 | 46.537 | 4 | ²¹¹At α-therapy |
| ⁴ He ²⁺ | 28 | 1.526 | 1.515 | 46.540 | 4 | ²¹¹ At α-therapy |
| ⁴He²⁺ | 50 | 2.043 | 2.016 | 30.960 | 2 | ²¹⁰At γ-SPECT |
| H⁻ | 18 | 1.232 | 1.209 | 36.856 | 2 | PET-CT |
| H⁻ | 30 | 1.596 | 1.546 | 47.140 | 2 | BNCT, ⁹⁹Mo-^{99m}Tc |
| H ⁺ | 50 | 2.071 | 1.966 | 29.969 | 2 | ⁹⁹ Mo- ^{99m} Tc |

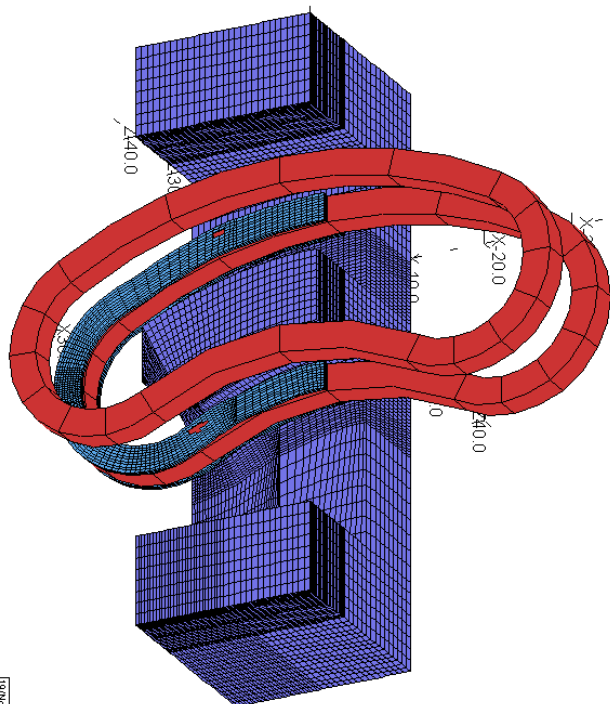
HTS Dipole magnetの要素開発

【Parameters】

- Max. magnetic field : 3 T
- Orbit radius : 400 mm
- Deflection angle : 60°
- Pole gap : 30 mm
- Laminated pole and yoke for AC operation



Bi-2223



Three double-pancakes and cooling plates are stacked and fixed with epoxy resin in vacuum.

リングサイクロトロン of ビーム振分用 HTS 電磁石の開発

RCNP cyclotron facility



HTS Wire:

Type : SEI, DI-BSCCO TYPE Hti-CA50

Size : W 4.6 mm × t 0.41 mm

Ic : ≥ 180 A @ 77 K, self field

Double Pan Cake (DPC):

Turn # : $64 \times 2 = 128$

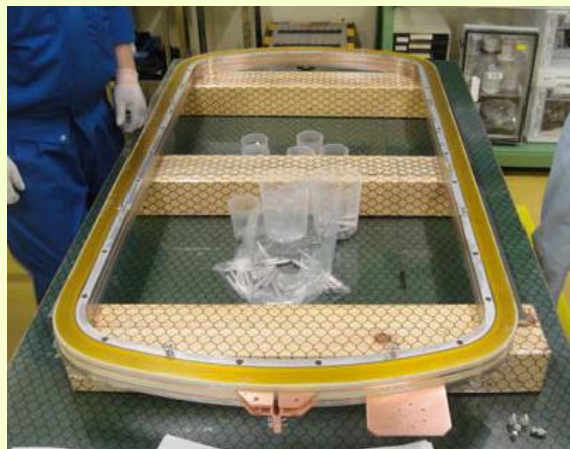
Size : L 920 mm × W 750 mm

Wire length : 855 m

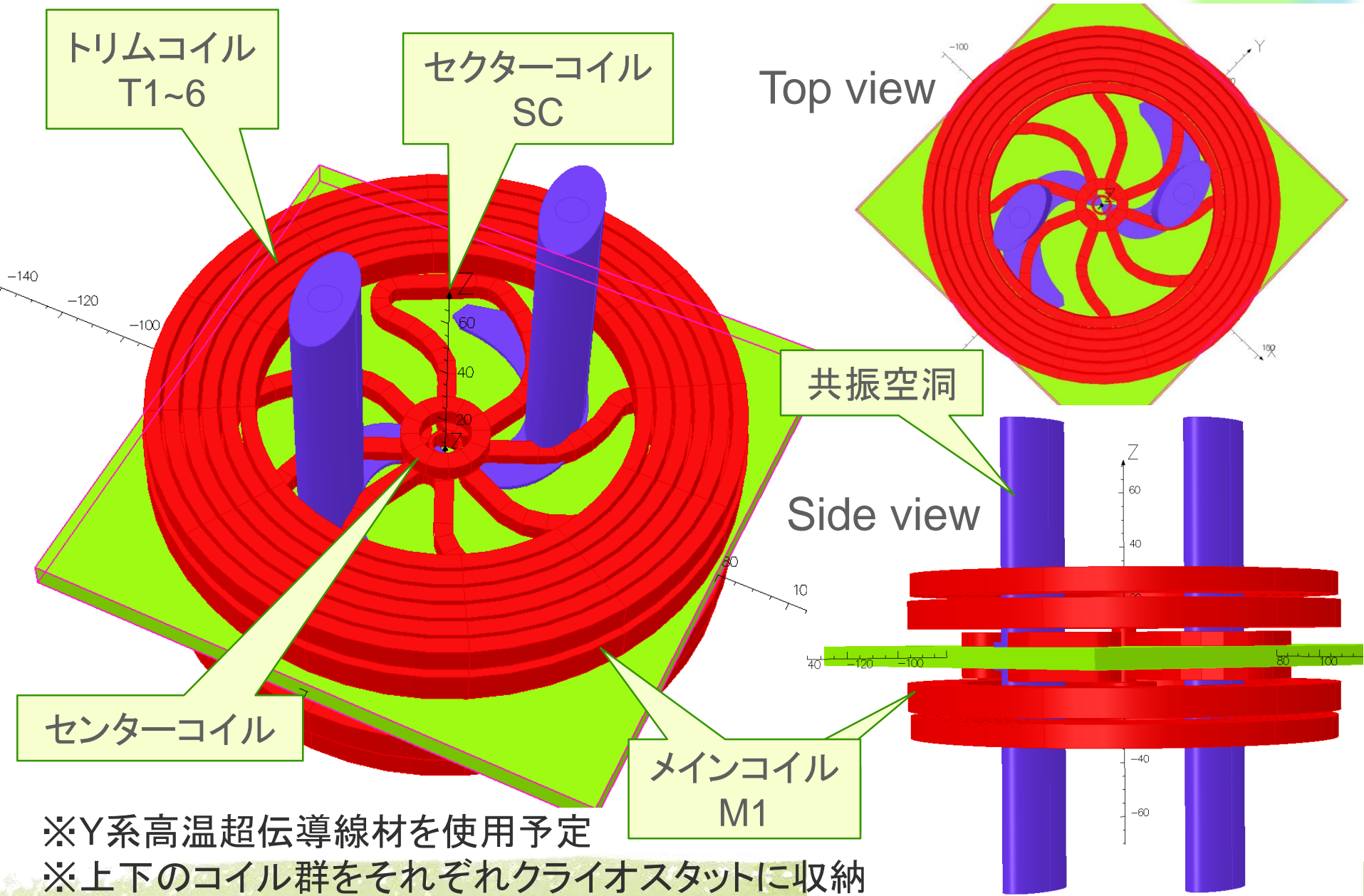
Total DPC # : $4 = 2 \times 2$

Operating temperature : < 20 K

Operating current : < 200 A



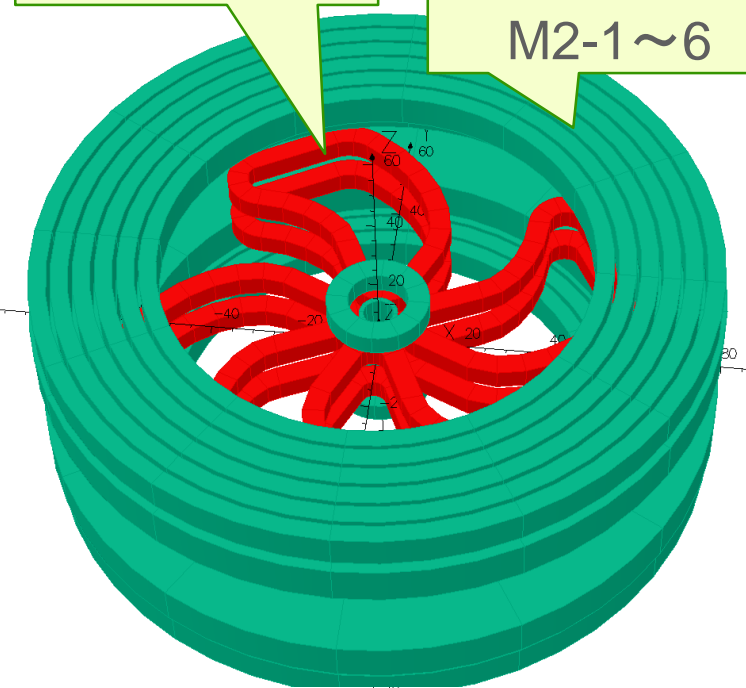
スケルトン・サイクロトロン[®]の構造



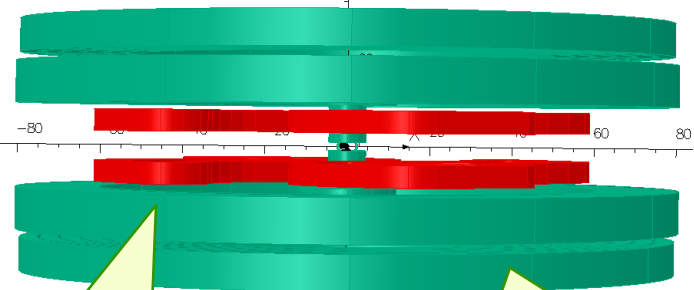
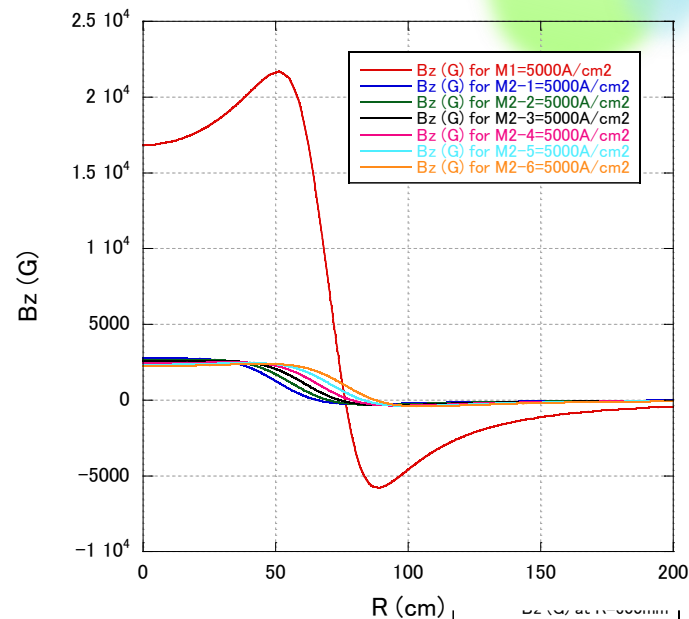
メインコイル&トリムコイル磁場分布

セクターコイル

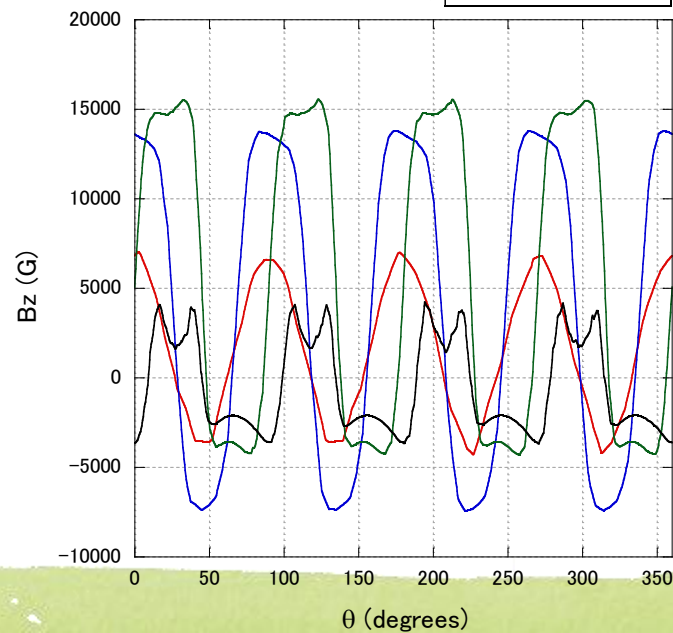
トリムコイル
M2-1~6



各コイルに個別に
5000A/cm²通電した
ときの半径方向
の磁場分布の例



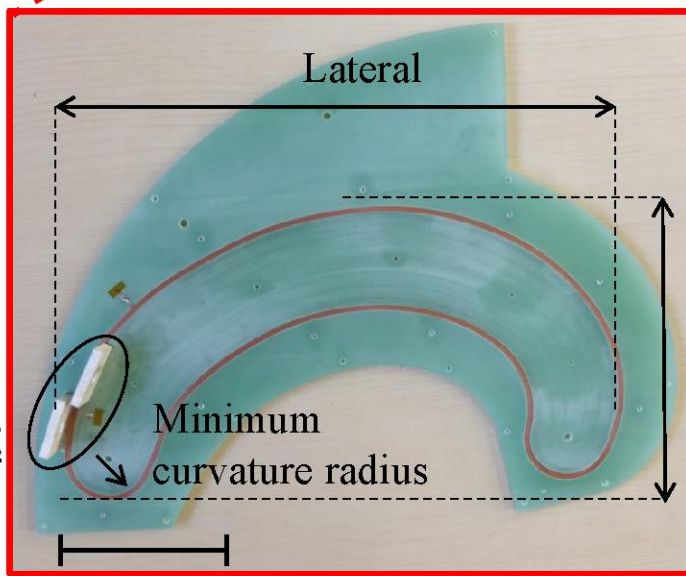
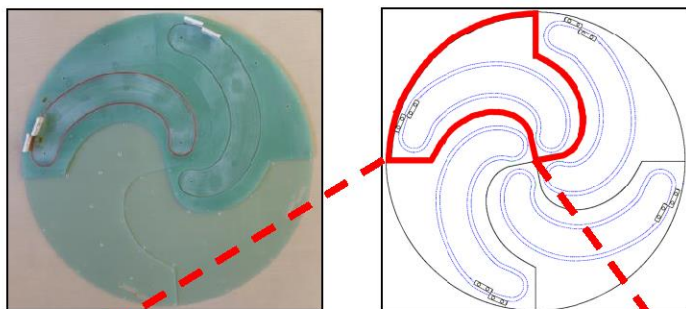
セクターコイルの
みに10,000A/cm²
通電したときの方
位角方向の磁場分
布の例



メインコイル
M1

トリムコイル
M2-1~6

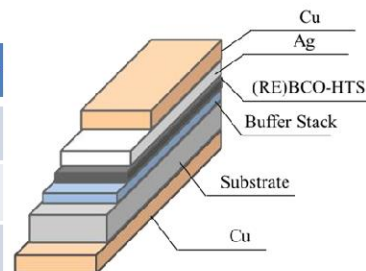
セクターコイルの試作 (早稲田大学、中部電力)



0.05 [m]

[線材諸元]

| | Super Power |
|-----------------------------|-------------|
| Thickness [μm] | 150 |
| Width [mm] | 4 |
| Length [m] | 24.6 |



[コイル諸元]

| | Real | Trial |
|------------------------------|-------|-------|
| Lengthwise [m] | 0.815 | 0.18 |
| Lateral [m] | 1.50 | 0.359 |
| Minimum curvature radius [m] | 0.053 | 0.025 |
| Height of 1 coil [m] | 0.13 | 0.004 |
| Maximum experience field [T] | 8.99 | - |
| Turn | 650 | 23 |

→ 約 $\frac{1}{4}$

→ $\frac{1}{2}$

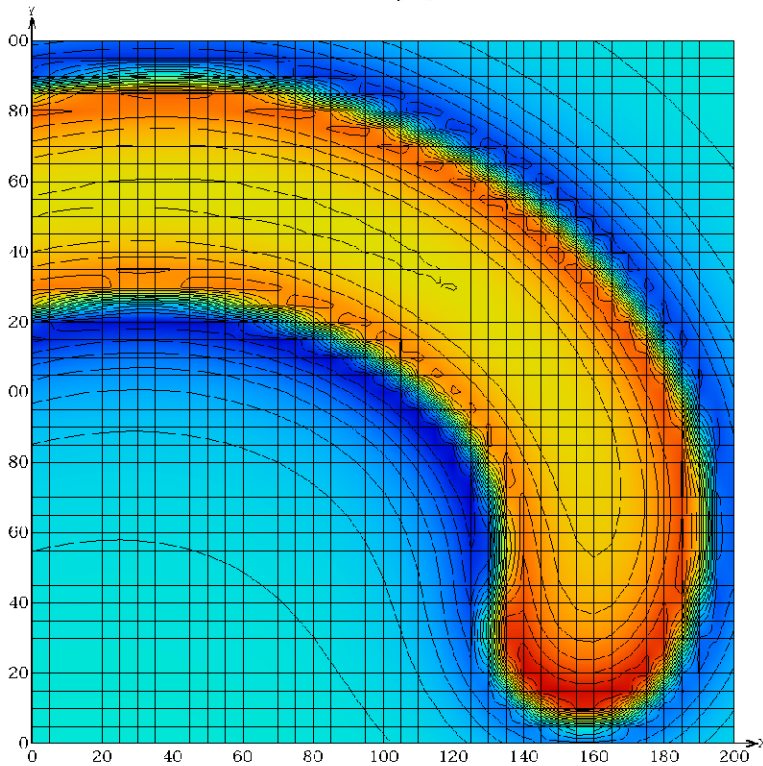
大きさ: **約4分の1**, 最小曲率半径: **2分の1**のモデルコイルを試作

試作セクターコイルの磁場測定

(早稲田大学、中部電力)

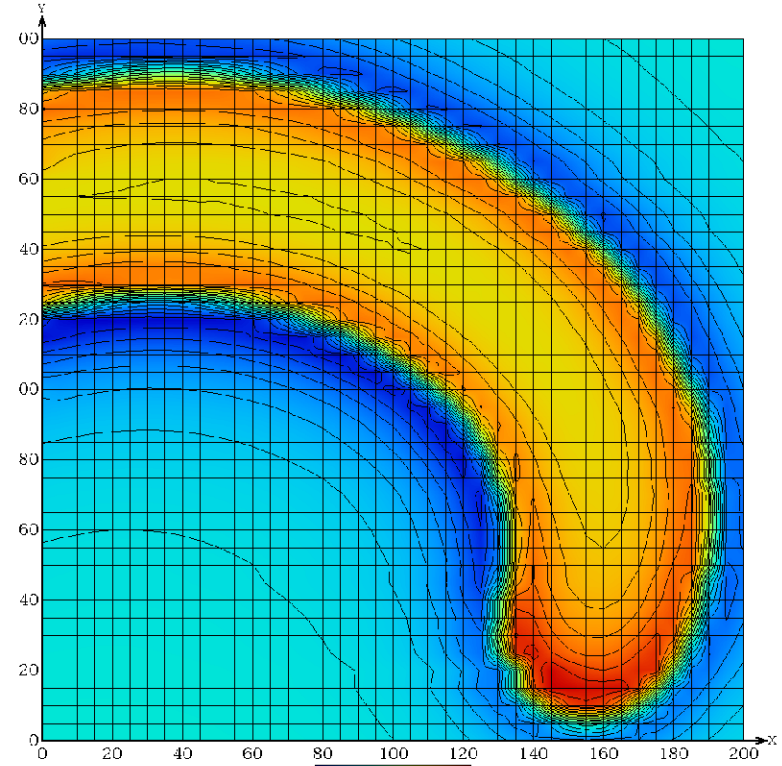
計算

実験



Min-111.51[G]

Max 185.17[G]



Min-111.14[G]

Max 184.83[G]

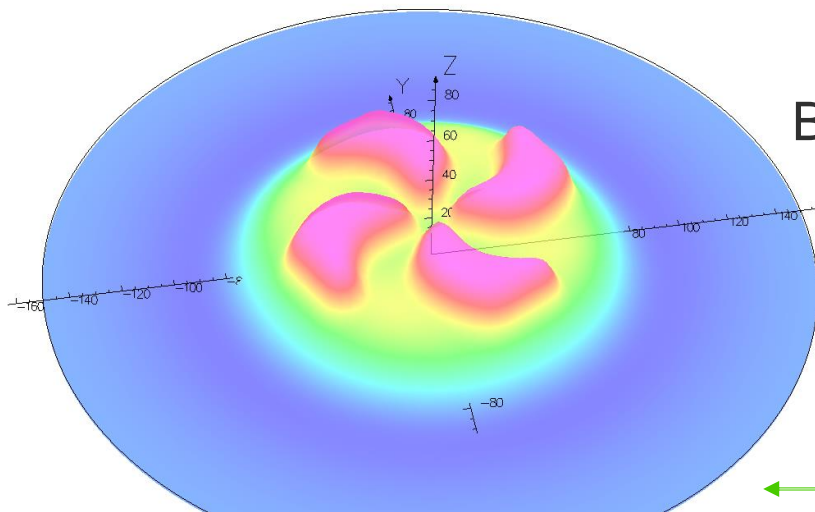
事前の設計計算に対して、試作コイルの発生磁場は設計磁場とほぼ一致している

メイン&トリム&セクターコイル合成磁場分布の例

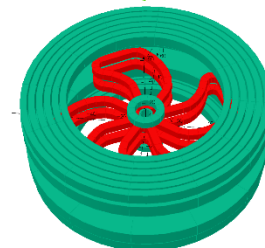
コイル電流

| Coil | Current density (A/cm ²) |
|------|--------------------------------------|
| M1 | 1000 |
| T1 | 4000 |
| T2 | 5000 |
| T3 | 5500 |
| T4 | 6500 |
| T5 | 7500 |
| T6 | 10000 |
| SC | 10000 |

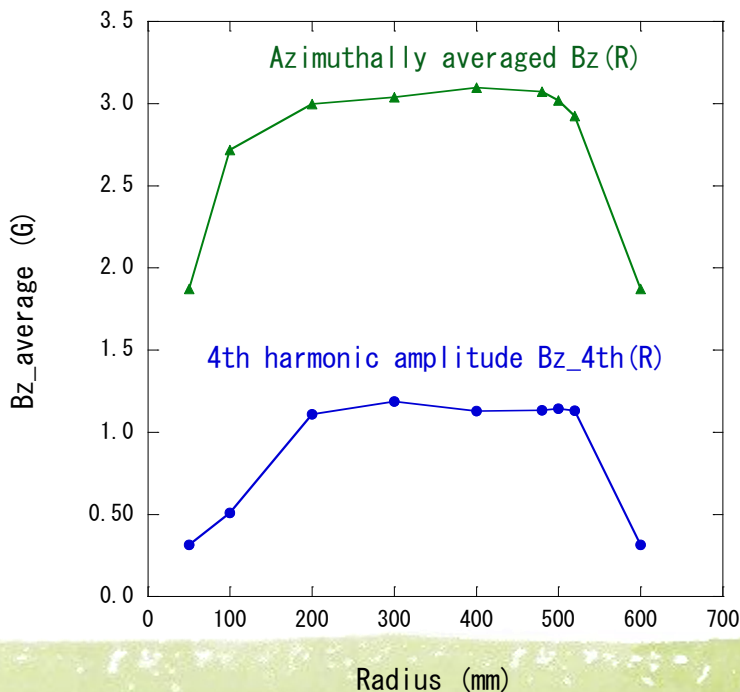
Map contours: Bz
4.048572E+004
3.500000E+004
3.000000E+004
2.500000E+004
2.000000E+004
1.500000E+004
1.000000E+004
5.000000E+003
0.000000E+000
-5.203583E+003
Integral = 2.136427E+008



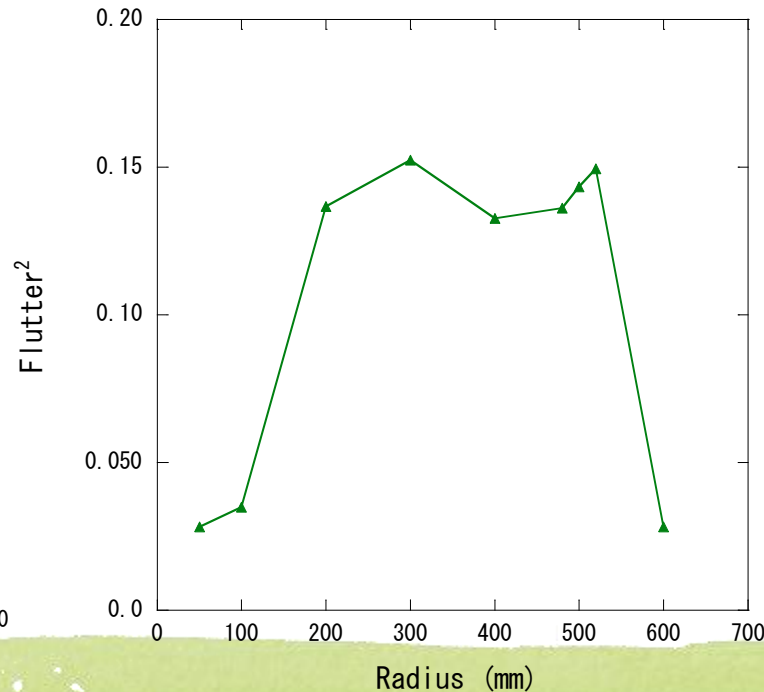
Bz(r,θ)分布



平均磁場と4回対称磁場強度

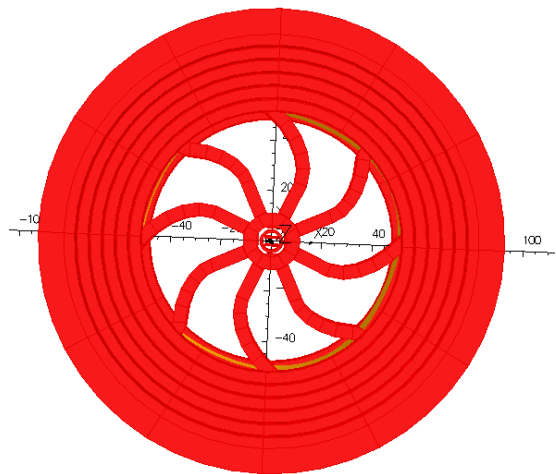


フラッター F²

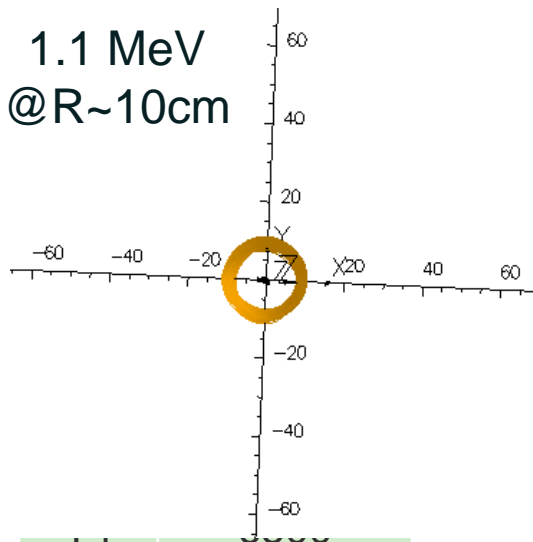


ビーム軌道解析

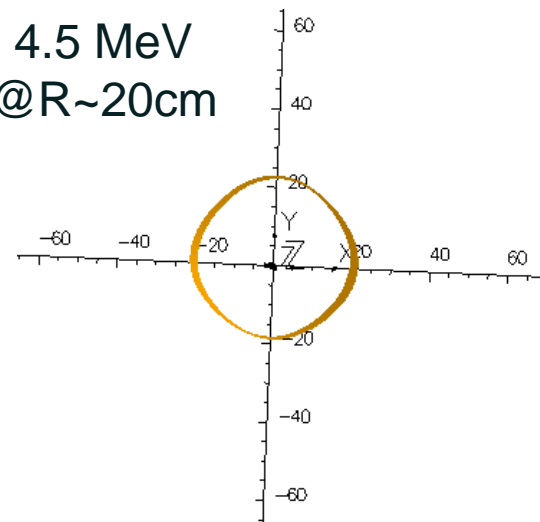
● $4\text{He} + 28\text{MeV}$ の平衡軌道の例



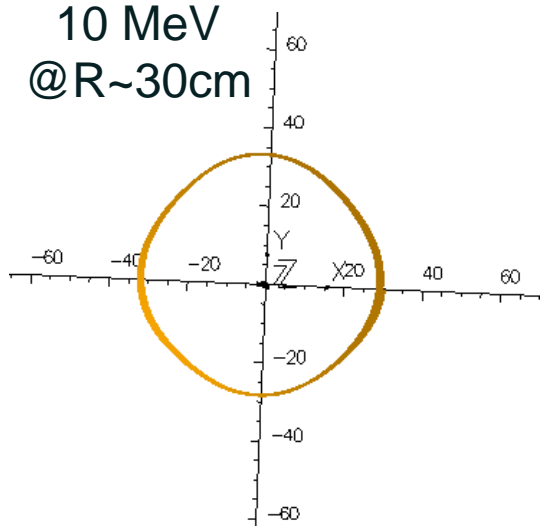
1.1 MeV
@R~10cm



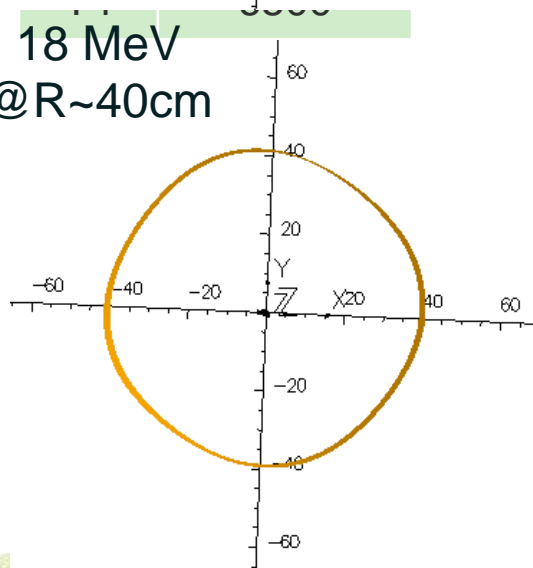
4.5 MeV
@R~20cm



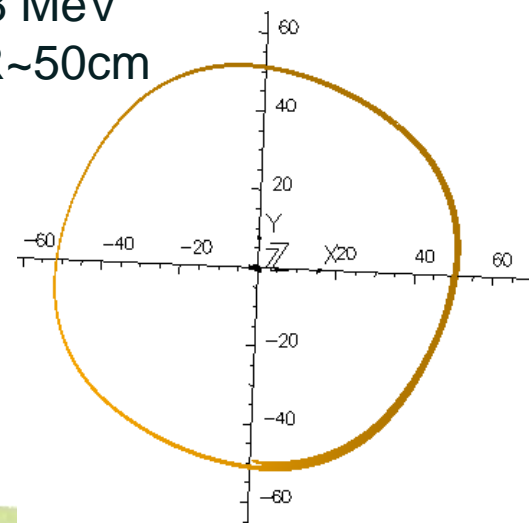
10 MeV
@R~30cm



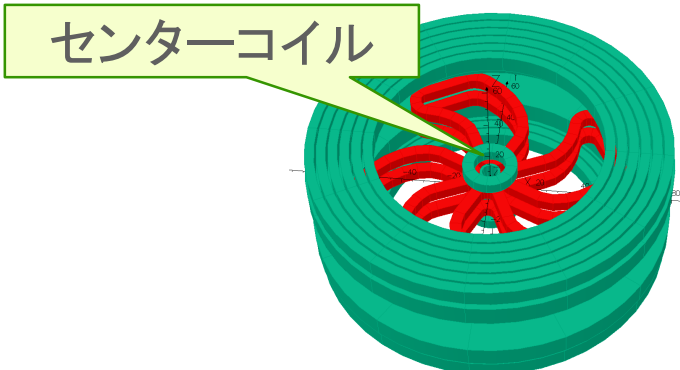
18 MeV
@R~40cm



28 MeV
@R~50cm

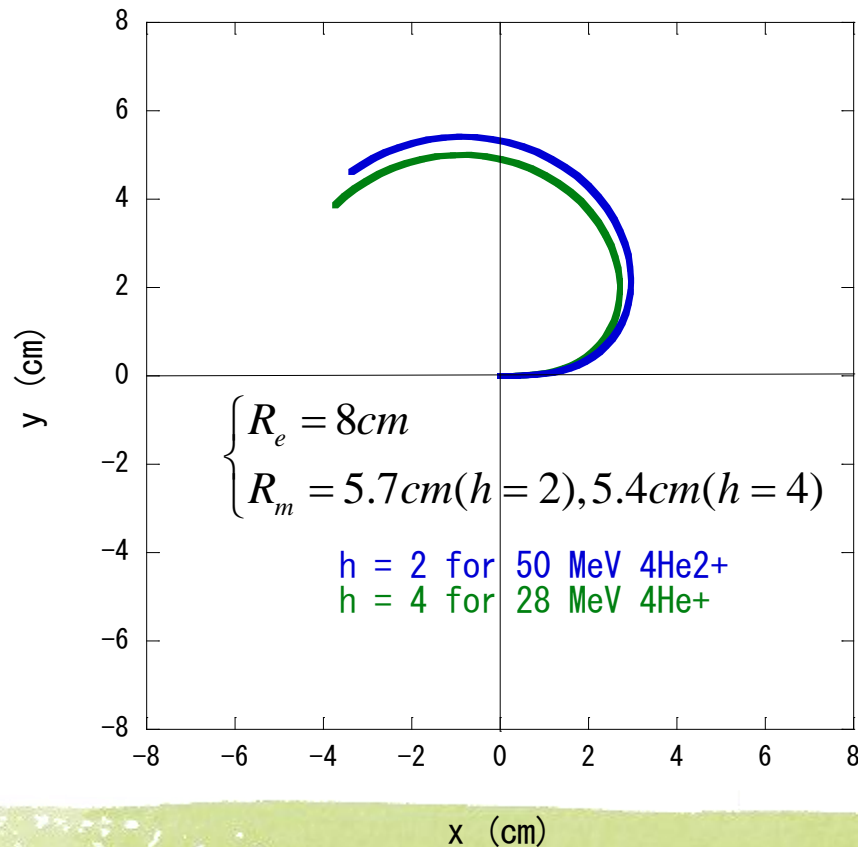
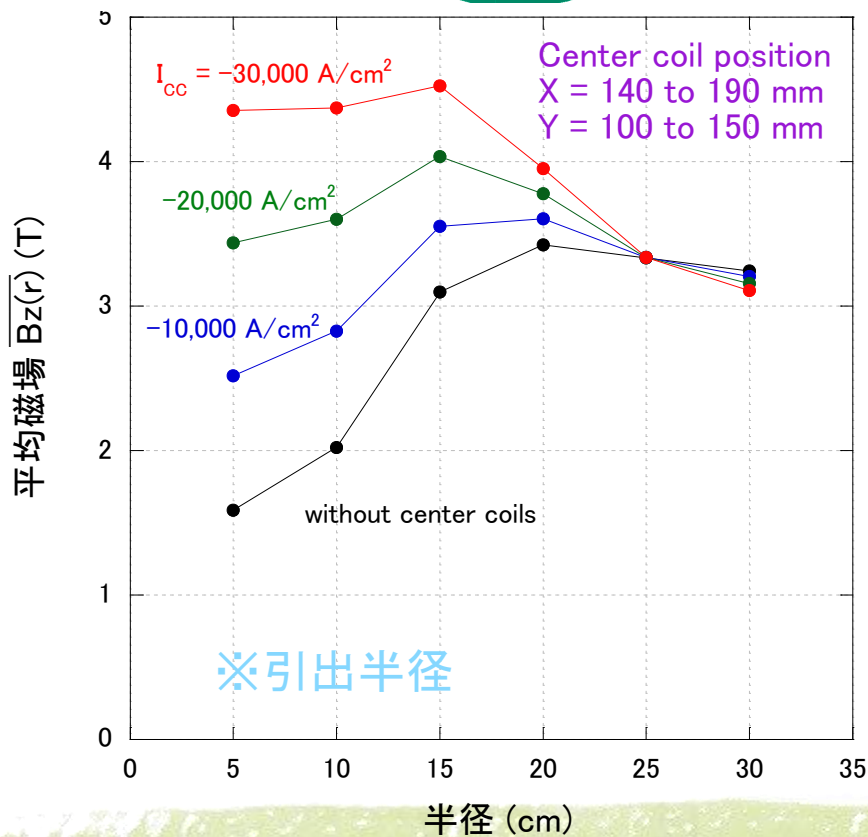


センターコイル磁場とインフレクターでのビーム軌道



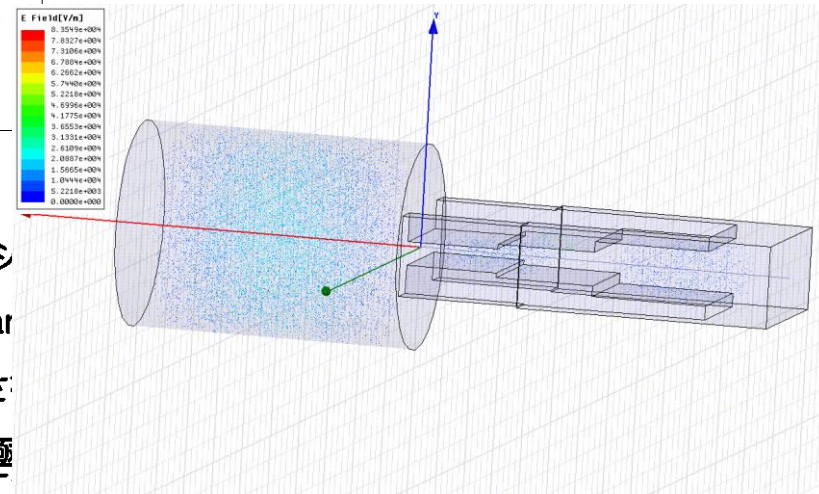
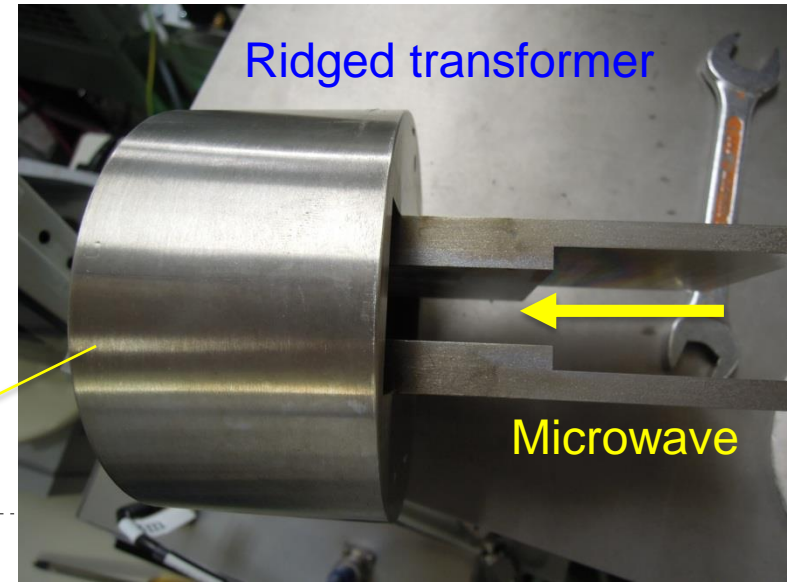
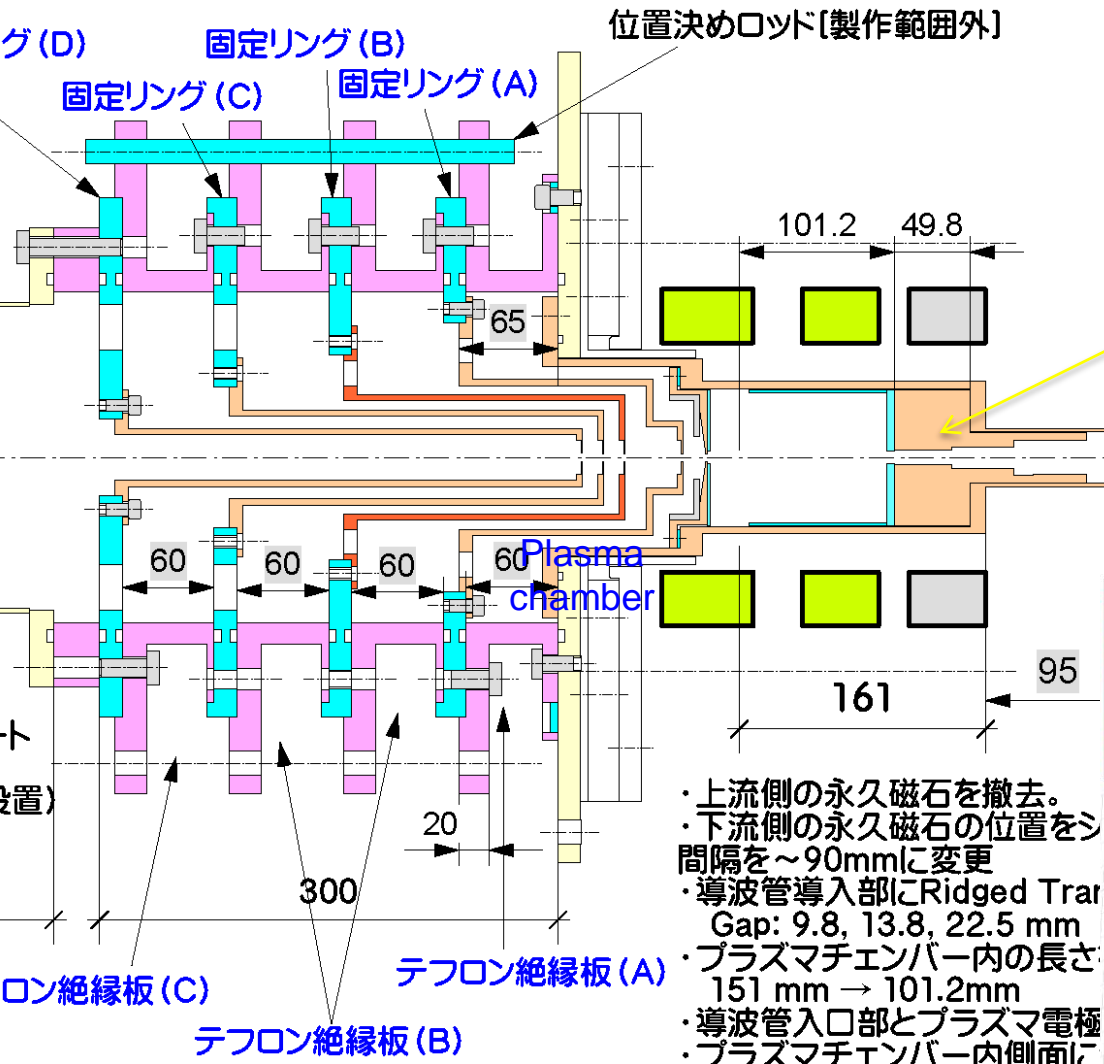
スパイラル・インフレクターでのビーム軌道

- ・イオン源加速電圧: 80kV
- ・中心磁場: 2.02 T for $h=2$
3.03 T for $h=4$



高輝度ヘリウムイオン源

●2.45GHz 永久磁石型ECR陽子源の設計をベースに高輝度化



mA級高強度ビームの入射

●中心領域での位相バンチングにより、進行方向の空間電荷効果によるビーム発散を抑制

※エネルギー利得を変調させる

Geometric Trajectory Model

The geometric trajectory model was used in order to obtain bending angles of particles between the 1st and 2nd acceleration gaps. We assumed that the particle a and the reference particle in the median plane and uniform field were instantaneously accelerated perpendicular to the center line of the 1st acceleration gap and to the line between the radial position at the 1st acceleration gap and the cyclotron center, respectively. The RF phase differences of particles is the product of the bending angle difference and h .

- Orbit radius and Initial phase for the reference particle

$$r_p = \frac{\sqrt{2m_0c^2}}{300B} \sqrt{\frac{M}{Q} (V_{\text{lon}} - V_{\text{Dee}} \sin \phi_p)} \quad \phi_p = -h \left(\theta_p - \frac{\theta_{\text{Dee}}}{2} \right)$$

- Orbit radius for particle a at phase $\Delta\phi_a$ from ϕ_p

$$r_a = \frac{\sqrt{2m_0c^2}}{300B} \sqrt{\frac{M}{Q} [V_{\text{lon}} - V_{\text{Dee}} \sin(\phi_p + \Delta\phi_a)]}$$

- Orbit center position of the particle a on the 1st acceleration gap

$$x_a = r_a \cos \theta_c - r_p \sin \left(\theta_p - \frac{\theta_{\text{Dee}}}{2} \right), \quad y_a = r_a \sin \theta_c + r_p \cos \left(\theta_p - \frac{\theta_{\text{Dee}}}{2} \right)$$

- Distance d , Angle difference θ_E (to obtain θ_a)

$$d = y_a - \tan \left(\frac{\pi - \theta_{\text{Dee}}}{2} \right) x_a \quad \theta_E = \theta_c - \theta_p + \frac{\pi + \theta_{\text{Dee}}}{2}$$

- Sine theorem

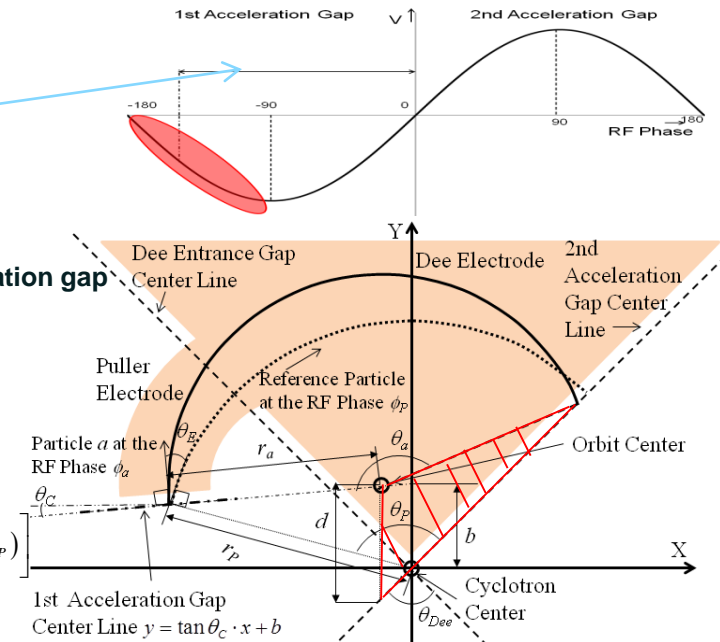
$$\frac{r_a}{\sin \frac{\theta_{\text{Dee}}}{2}} = \frac{d}{\sin \{ \theta_a - (\theta_E + \theta_p) \}}$$

- Bending angle θ_a

$$\theta_a = \theta_E + \theta_p + \sin^{-1} \left[\frac{r_p}{r_a} \sin \theta_p - \sin(\theta_E + \theta_p) \right]$$

- Phase difference $\Delta\phi_S$ from the reference particle at the 2nd acceleration gap

$$\Delta\phi_S = \Delta\phi_a + h \cdot \theta_E + h \cdot \sin^{-1} \left[\frac{\sqrt{1 - V_R} \sin \phi_p}{\sqrt{1 - V_R} \sin(\phi_p + \Delta\phi_a)} \sin \theta_p - \sin(\theta_E + \theta_p) \right]$$



Phase bunching key parameter

- θ_E have little influence on phase bunching.
- There is no phase bunching for $\theta_p=180$.

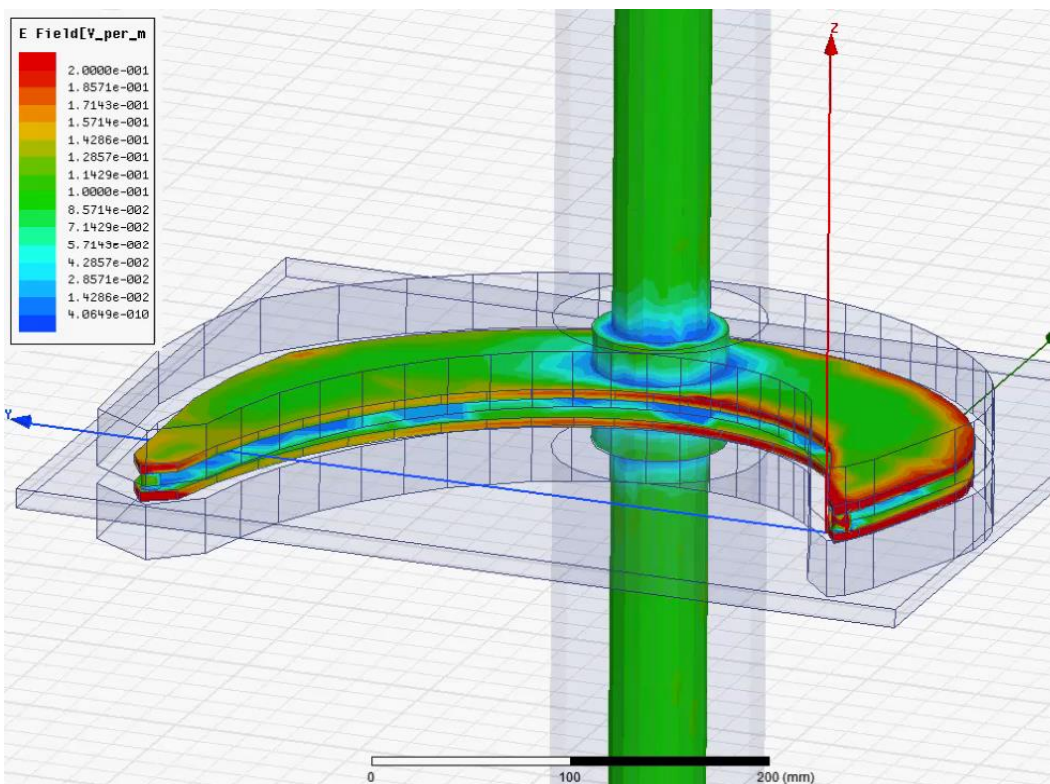
Application to the Skeleton Cyclotron

共振空洞の設計

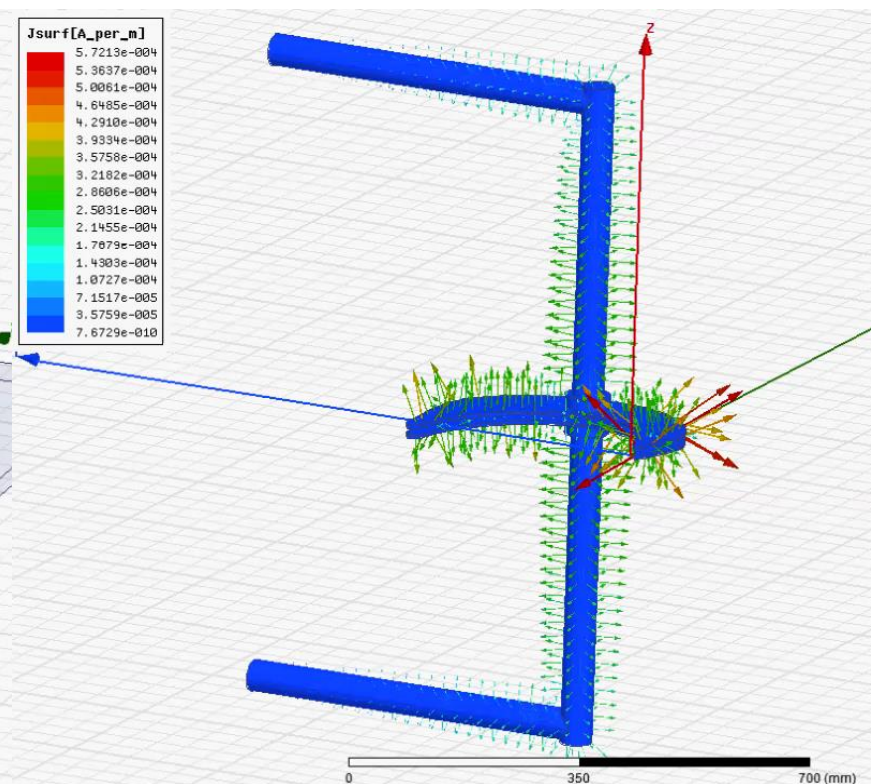
● Model condition

- 加速電極ギャップ: vertically ± 5 mm, horizontally 3 degrees in azimuth
- 同軸空洞径: Inner tube = $\phi 50$ mm, Outer tube = $\phi 110$ mm
- 同軸空洞曲折位置: $z = 500$ mm

電場分布@52.6MHz



電流密度分布@52.6MHz



4. まとめ

1. RI生成用ビームラインを整備@AVFサイクロトロン棟
 - ・Kコース@S実験室
 - ・Fコース@M実験室
2. 高強度小型高温超伝導サイクロトロンの設計検討
 - ・アルファ線内用療法の実用化を目指し、数十GBq級のAt-211生成が目標
 - ・そのためには数百 μ A級のアルファビームが必要
 - ・引出半径50cm、最大平均磁場3.2T程度(K120)
 - ・Y系高温超伝導線材を用いたコイル群から構成
 - ・10mA級高輝度4He+イオン源の開発
 - ・サイクロトロン中心領域における位相バンチングにより、進行方向の空間電荷効果を抑制
 - ・10kW級のハイパワー内部ターゲット開発が必要
 - ・住重との共同研究を開始(2014年、RI生成)