

# スケルトンサイクロトロン の 概念設計

大阪大学 核物理研究センター  
中尾政夫

# 1. スケルトンサイクロトロンの目的

# スケルトンサイクロトロン 量子アプリのビジネス化を支える高強度小型多機能加速器

## アルファ線核医学治療による 進行がん治療ビジネス

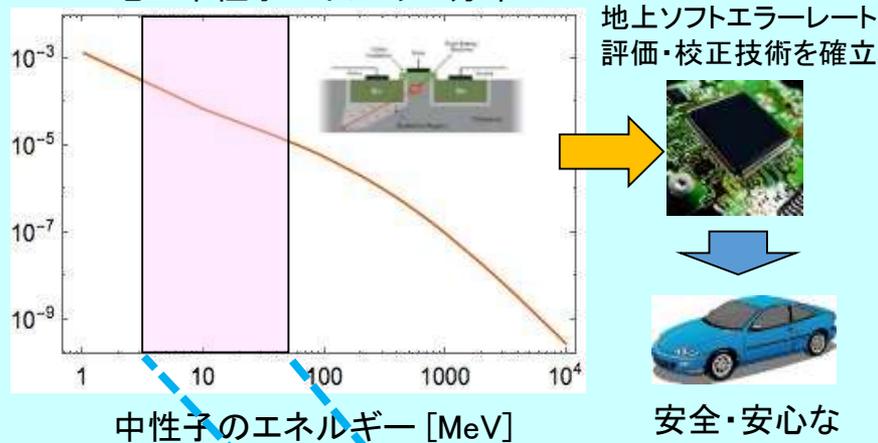


治療用RIを製造できる  
多機能小型加速器の普及

安心して暮らせる  
長寿社会の実現

## 半導体デバイスのソフトエラー評価ビジネス

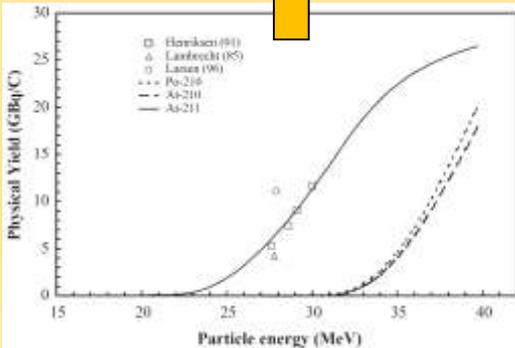
### 地上中性子エネルギー分布



中性子のエネルギー [MeV]

地上ソフトウェアレート  
評価・校正技術を確立

安全・安心な  
交通社会の実現



ヘリウムビーム  
(30MeV)

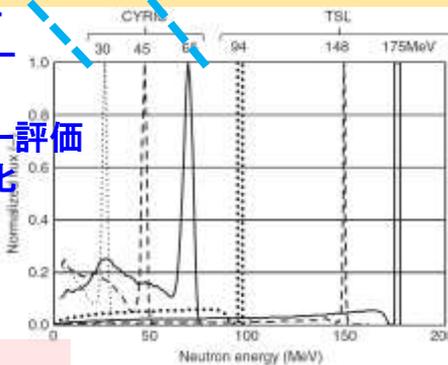
を用いたアルファ線  
放出核種At-211を  
大量製造

高強度  
ヘリウムビーム  
+  
ビスマスターゲット

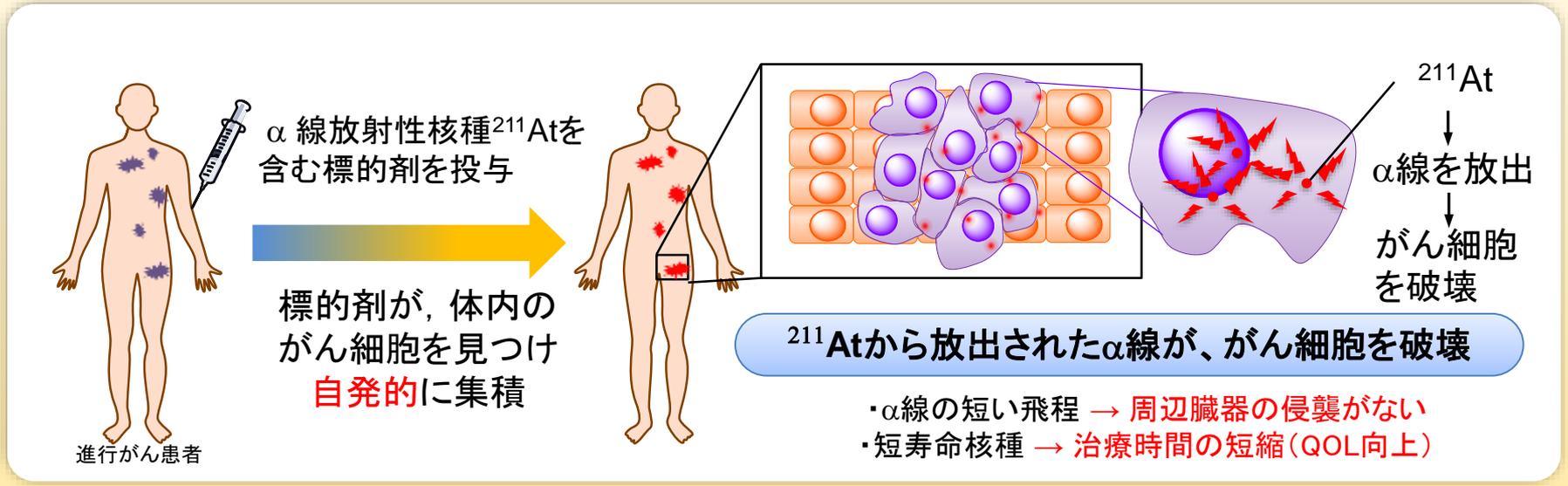
準単色中性子  
中低エネルギー  
(3~40MeV)

を用いたソフトエラー評価  
試験を高効率化

高強度陽子ビーム  
+リチウムターゲット

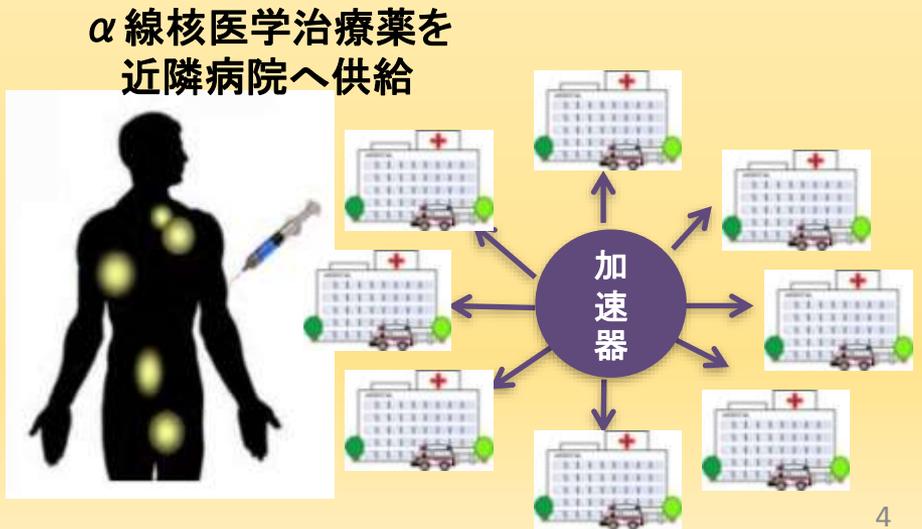


# アルファ線核医学治療法の研究



アスタチン-211(<sup>211</sup>At):  
 アルファ線放出核種.  
 半減期は7.2時間.  
 ハロゲン族元素.  
 安定同位体がない.

α線核医学治療 X PET  
 = 診断と治療が直結



# $^{211}\text{At}$ の生成

$^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$  の反応で生成する。 $\alpha$  のエネルギーが高い方にずれると、 $^{209}\text{Bi}(\alpha, 3n)^{210}\text{At}$  反応が起き、 $^{210}\text{At}$  は有害な  $^{210}\text{Po}$  に壊変してしまう。 $^{210}\text{At}$  が生成しないように、ビームの正確なエネルギー調整が必要。

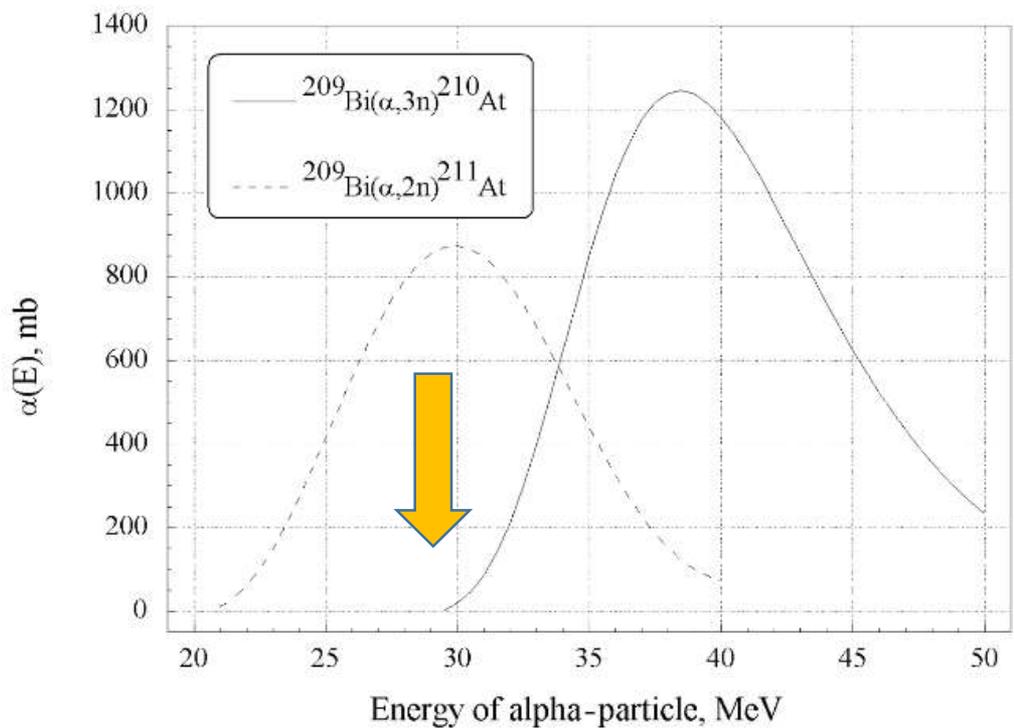


Fig. 2. Fit of the cross section data taken from the literature for the  $^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$  and  $^{209}\text{Bi}(\alpha, 3n)^{210}\text{At}$  reactions<sup>6,7</sup>

## Alpha emitter and energy

RI	$T_{1/2}$	$E_{\alpha}$ (MeV)
Tb-149	4.2 h	4.0
Bi-212	61 min	8.8
Bi-213	46 min	8.4
<b>At-211</b>	<b>7.2 h</b>	<b>6.0, 7.6</b>
Ra-223	11.4 d	5.8
Ra-224	3.66 d	5.8
Ac-225	10 d	5.9

既に使われているが  
海外の原子炉で生産

# 大阪大学でのアルファ線核医学治療の開発

## 強み

同じキャンパスの中に大型加速器施設とFirst-in-Human試験(新規医薬品を世界で初めてヒトに投与する臨床試験)ができる臨床研究中核施設である**医学部附属病院がある。**

開発から臨床応用までが  
One stopで



- 核物理研究センターに $^{211}\text{At}$ 生成専用ビームラインを整備
- 年間500時間以上のAt-211製造・供給(月に1~2回)

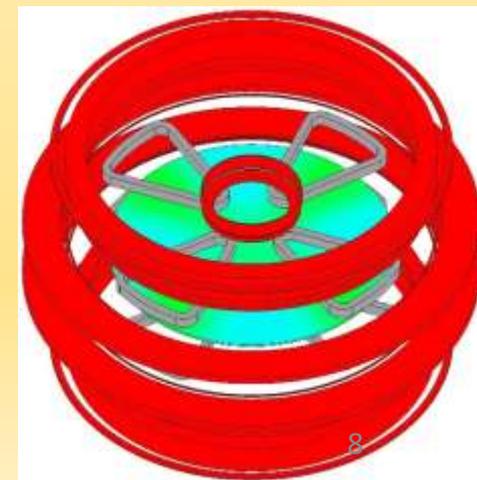
## 主な実績

- $^{211}\text{At}$ の分離精製法の確立(特許出願)
- 医学系研究科で $^{211}\text{At}$ イオンの動物の体内動態を画像化(世界初)
- 理学研究科が複数の薬剤候補分子の $^{211}\text{At}$ 標識化に成功
- 理研やQST放医研からも供給(短寿命RI供給プラットフォーム)

## 2. スケルトンサイクロトロン設計

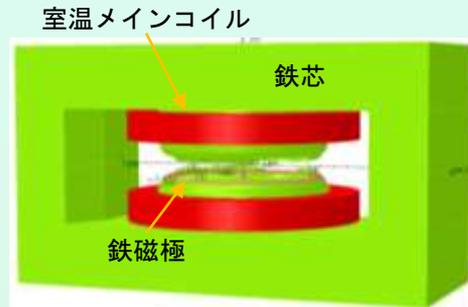
# スケルトンサイクロトロンの特徴

- 高温超伝導コイルを使う・鉄芯がない
  - ヒステリシスがなく、再現性の高い・安定した磁場を作成可能
- 粒子・エネルギー可変
  - Alpha ( $^4\text{He}^{2+}$ ) 30MeV ( $^{211}\text{At}$ 製造)→アルファ線核医学治療
  - Deuteron 40 MeV Proton 30MeV (中性子源)
    - BNCT中性子源
    - 半導体デバイスのソフトエラー評価
- 小型である
  - 取り出し半径50cm



# 従来型サイクロトロンとの比較

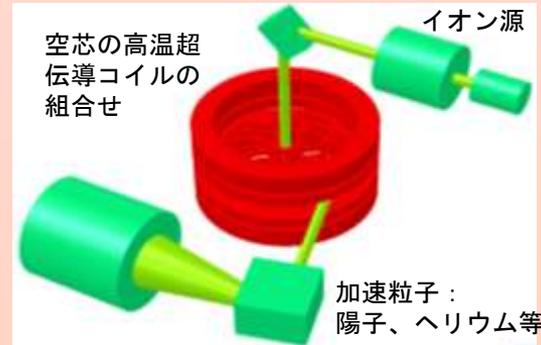
## 従来型のAVFサイクロトロン



### 【課題】

- ①室温コイルと鉄芯の組合せ  
→ 大きな消費電力、低い磁場強度
- ②ビーム強度の安定性  
→ 鉄心温度の変化に敏感
- ③運転パラメータの再現性  
→ ヒステリシスに依存
- ④鉄磁極の存在  
→ 空間的な自由度を奪う  
→ ビーム強度は100 $\mu$ Aが限界

## 世界初の“スケルトン・サイクロトロン”



放射性核種の製造量はビーム強度に比例

スケルトン・サイクロトロンで $\alpha$ 線核医学治療に必要な放射性核種を**多量**に、**安定**に、**安全**に製造

### サイクロトロン加速器技術のイノベーション

#### 【解決策】

- ★高温超伝導コイルを採用
  - ①省電力（約10分の1）で、かつ、高磁場を発生
  - ②磁場強度は室温に依らず極めて安定
- ★空芯型サイクロトロン（世界初）
  - ③磁場強度の再現性に優れ、運転が簡単
  - ④コンパクトで省スペース、内部機器の配置が自由、従来の10倍以上の大強度化が可能

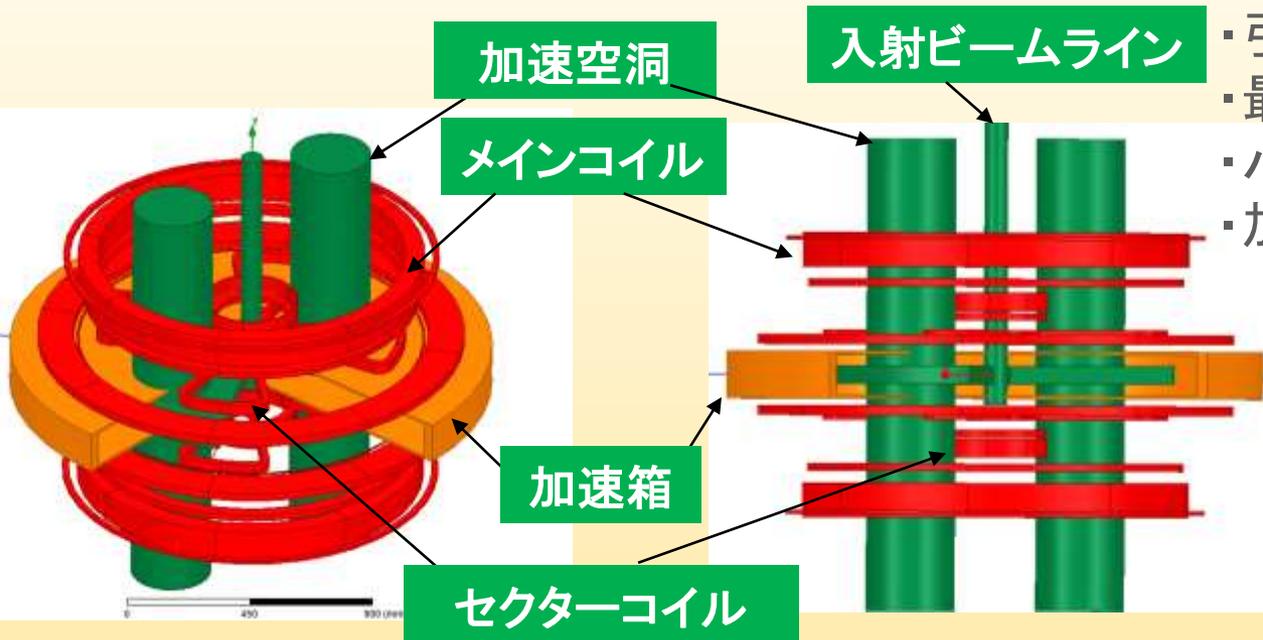
研究開発課題1：小型加速器・照射技術の高度化

# K80 Skeleton Cyclotronのパラメータ

- ・引出半径 : **50 cm**
- ・最大平均磁場 : **2.589 (T)** for  ${}^2\text{D}^+$  **40 MeV** → **K値 = 80 MeV**  
 ${}^4\text{He}^{2+}$  **30 MeV** →  $B_{\text{ext}} = 1.580$  (T) for  ${}^{211}\text{At}$  production
- ・加速ハーモニクス : **2** ←  **$\sim 90^\circ$  two Dee電極**
- ・加速周波数 : **24~60 MHz**

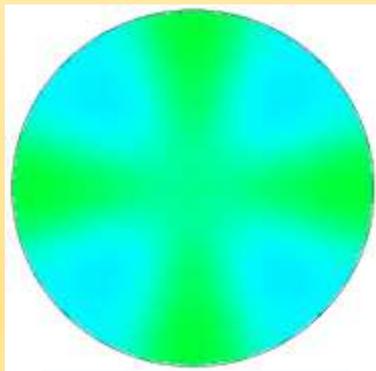
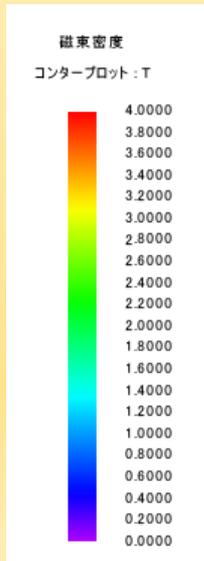
Ion	Energy (MeV)	$B_{\text{av}}$ (T) @50cm	$B_0$ (T) @center	$f_{\text{RF}}$ (MHz)	h	Applications
${}^4\text{He}^{2+}$	<b>30</b>	<b>1.580</b>	<b>1.568</b>	<b>24.086</b>	<b>2</b>	${}^{211}\text{At}$ $\alpha$ -therapy
${}^4\text{He}^{2+}$	<b>40</b>	<b>1.826</b>	<b>1.806</b>	<b>27.747</b>	<b>2</b>	${}^{210}\text{At}$ $\gamma$ -SPECT (?)
${}^4\text{He}^{2+}$	<b>80</b>	<b>2.589</b>	<b>2.534</b>	<b>38.931</b>	<b>2</b>	K-number
$\text{H}^-$	<b>18</b>	<b>1.232</b>	<b>1.209</b>	<b>36.856</b>	<b>2</b>	PET-CT, ${}^{225}\text{Ac}/{}^{213}\text{Bi}$
$\text{H}^-$	<b>30</b>	<b>1.596</b>	<b>1.546</b>	<b>47.140</b>	<b>2</b>	BNCT, ${}^{99}\text{Mo}$ - ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$
$\text{H}^-$	<b>50</b>	<b>2.071</b>	<b>1.966</b>	<b>59.937</b>	<b>2</b>	BNCT, ${}^{99}\text{Mo}$ - ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$
$\text{D}^- / \text{H}_2^+$	<b>40</b>	<b>2.589</b>	<b>2.534</b>	<b>38.798</b>	<b>2</b>	${}^{99}\text{Mo}$ - ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ , BNCT

# スケルトンサイクロトロン設計



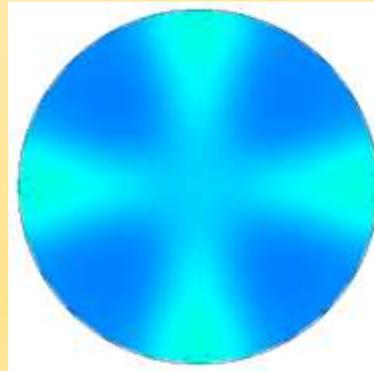
- ・引出半径 : 50 (cm)
- ・最大平均磁場 : 2.589 (T)
- ・ハーモニクス : 2 (90度Dee)
- ・加速周波数 : 24~60 (MHz)

ビーム加速平面での磁場分布



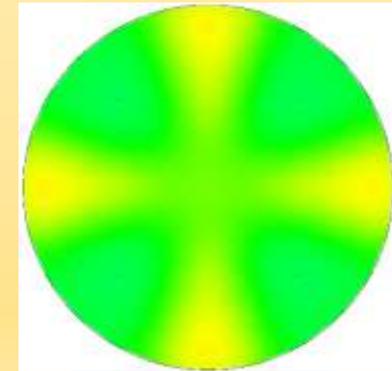
$^4\text{He}^{2+}$  36 MeV

$^{211}\text{At}$   $\alpha$ -therapy



$\text{H}^-$  18 MeV

PET-CT,  $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$

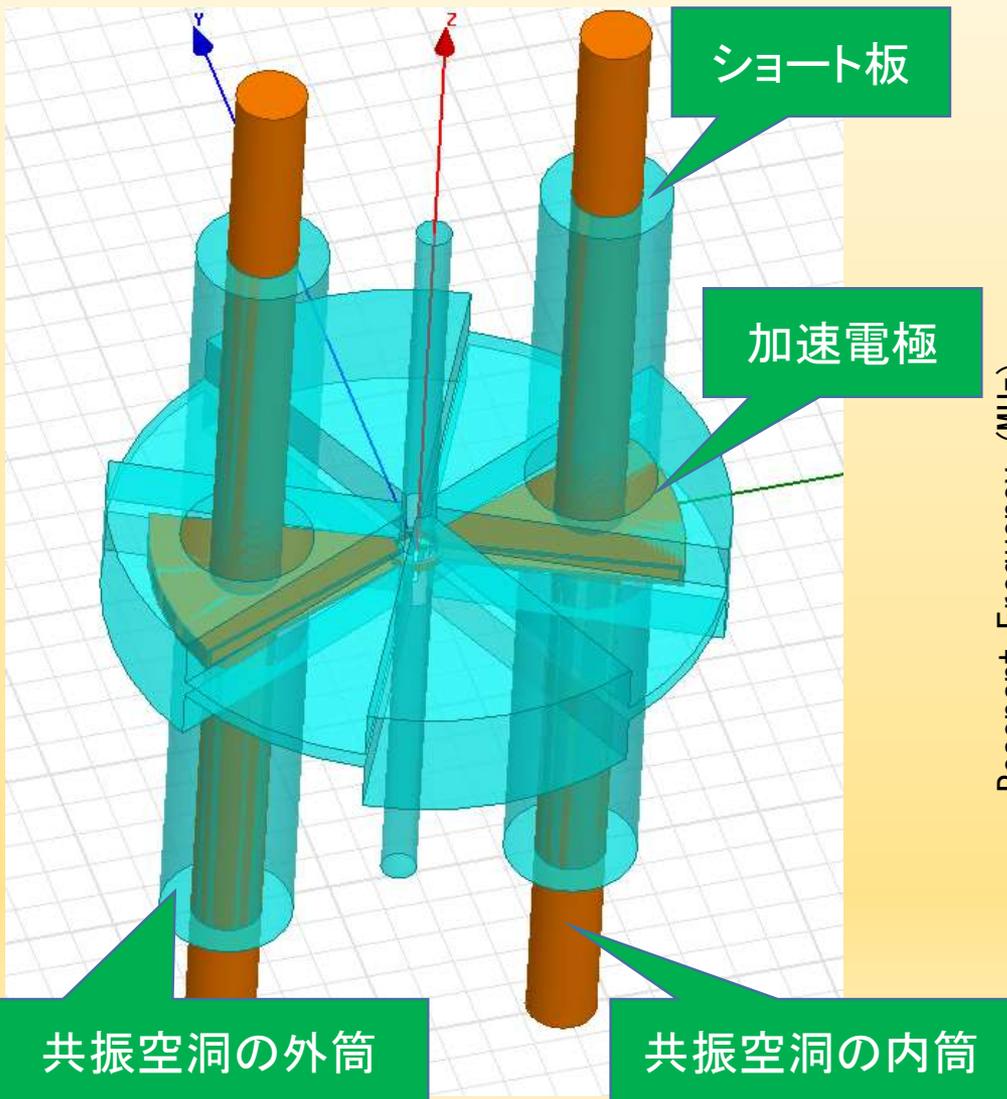


$\text{D}^+$  40 MeV

$^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , BNCT

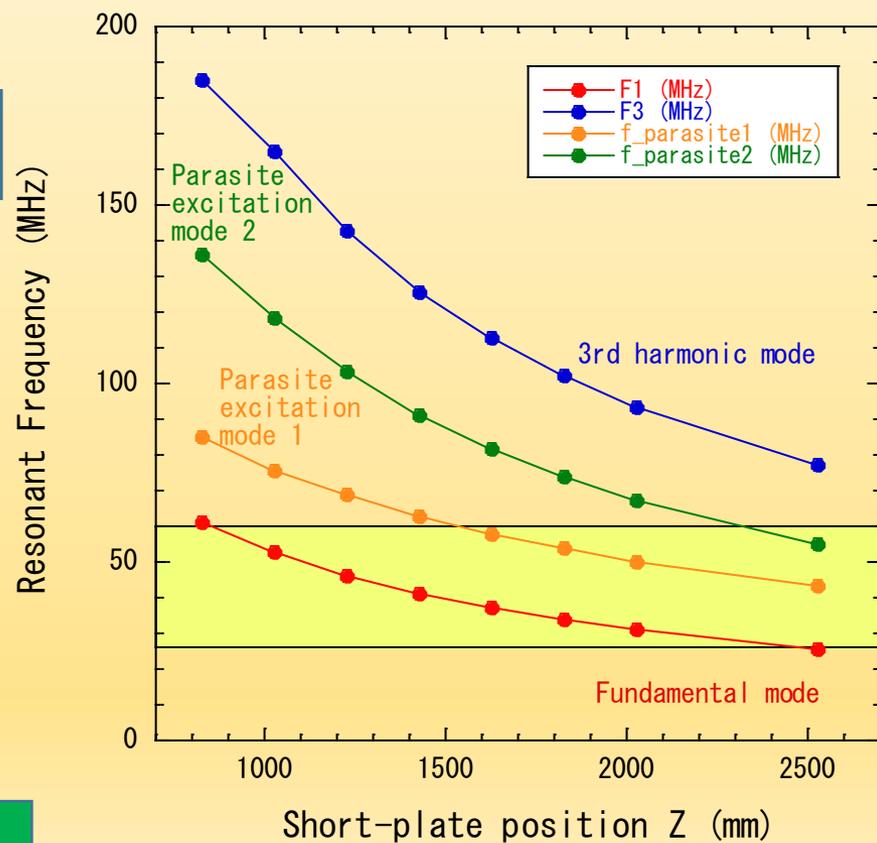
# 共振器の設計(共振空洞を鉛直から結合)

加速電極と $\lambda/2$ モードの共振空洞

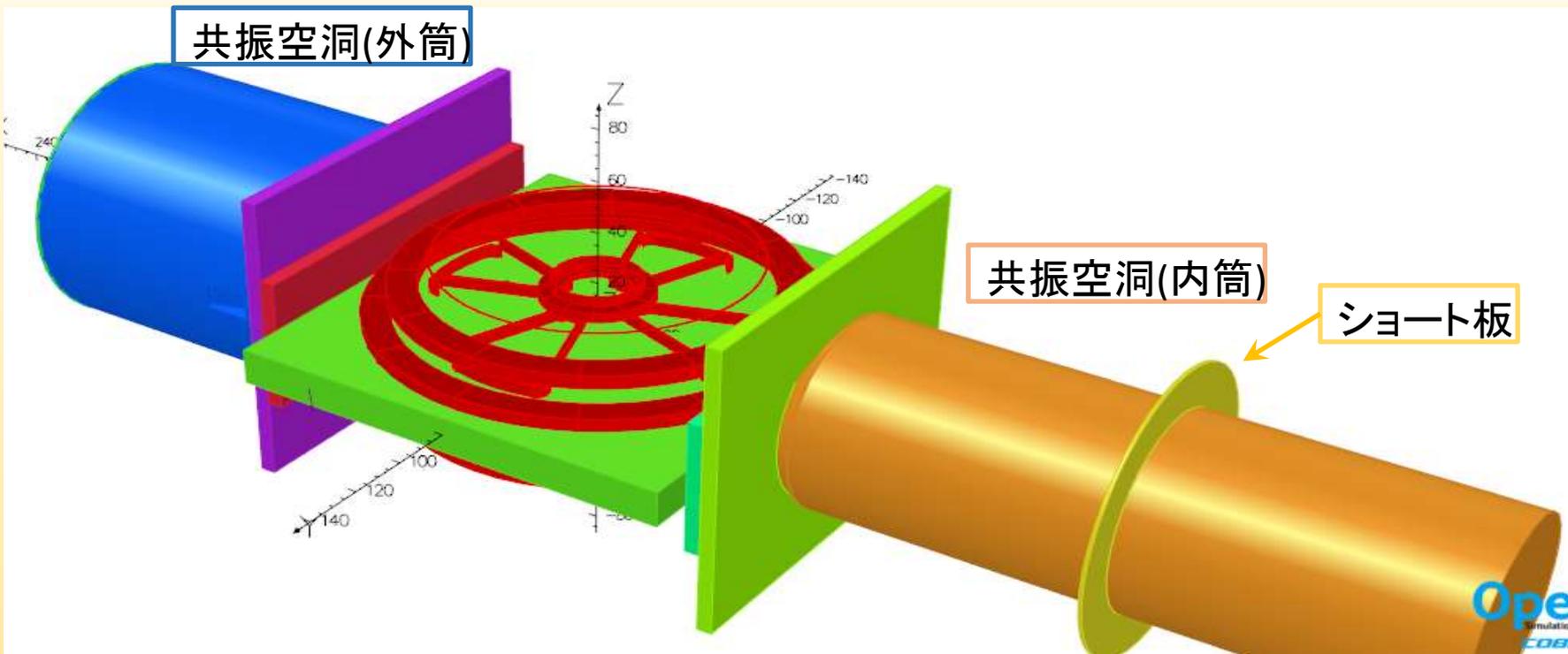


ショート板の位置と共振周波数

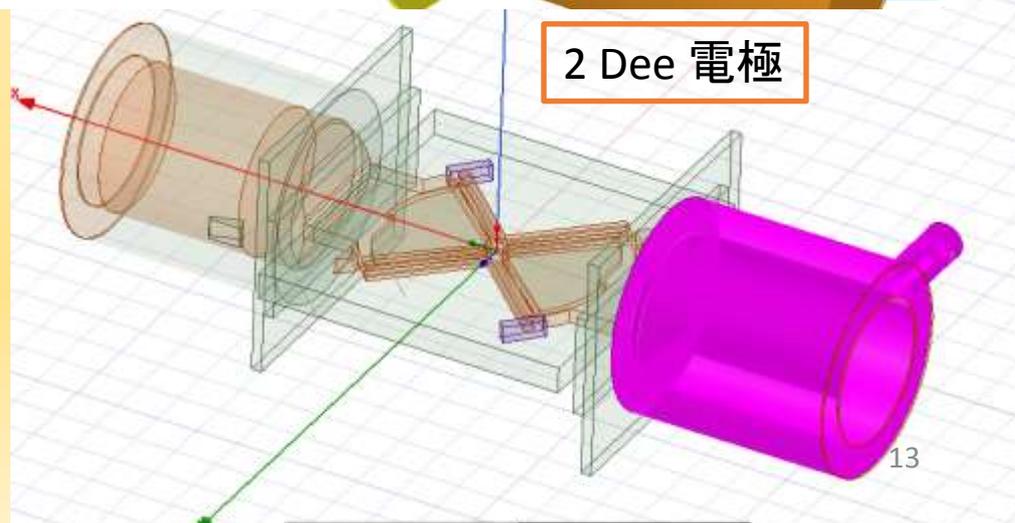
Short plate position vs. Frequency  
 $R_{cavity}=37\text{cm}$ ,  $R_{inner}=10\text{cm}$ ,  $R_{outer}=15\text{cm}$



# 共振器の設計(共振空洞を水平方向から結合)



鉛直方向に共振器を置いた時に比べて、サイクロトロンのコイル等の設計の自由度がある。設置面積は広くなるが、天井は低くてよい。

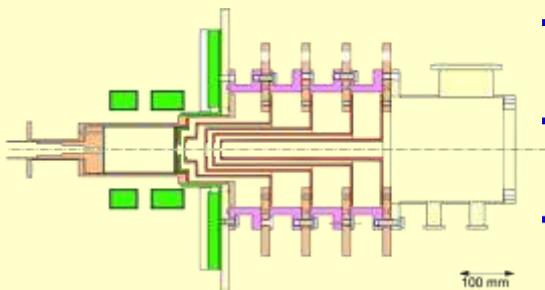


# 3. OPERAにおける要素技術開発

# OPERAにおける要素技術開発

## アルファビームの高強度化

高輝度ヘリウムイオン源



【目標性能】

- ・加速電圧  
50kV 以上
- ・ビーム強度  
 $^4\text{He}^{2+}$  mA級
- ・エミッタンス(規格化)  
 $0.2 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 以下

## 小型加速器の高強度化

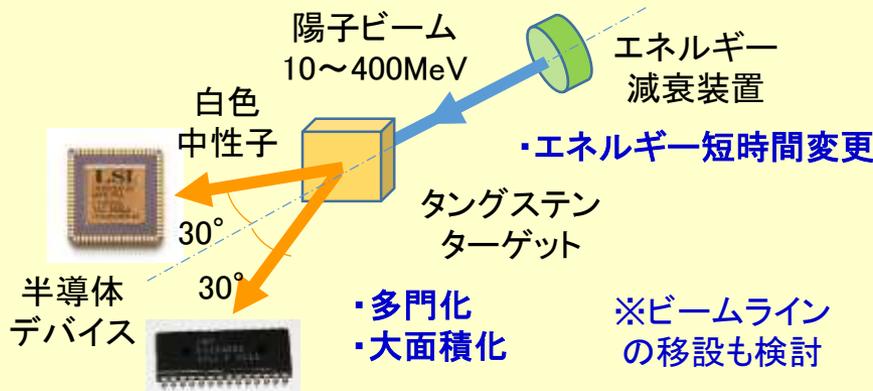
スケルトンサイクロトロン



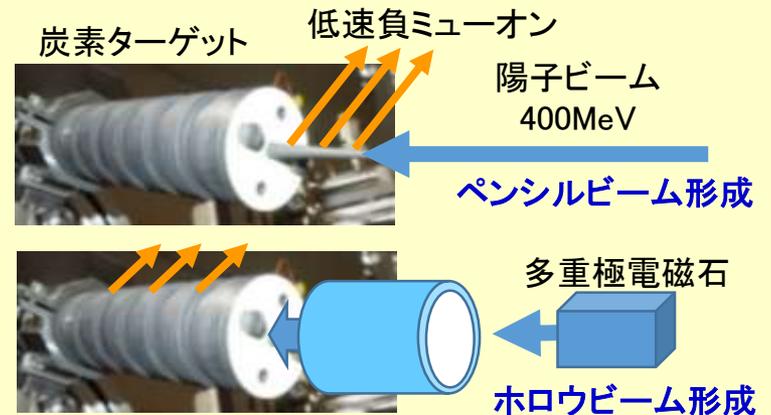
【目標性能】

- ・加速エネルギー  
 $^4\text{He}^{2+}$  ~40 MeV  
 $\text{H}^+ / \text{H}^-$  ~50 MeV
- ・ビーム強度  
 $^4\text{He}^{2+}$  数百  $\mu\text{A}$ 以上
- ・入射/引出効率  
30%/90% 以上

## 高強度白色中性子源



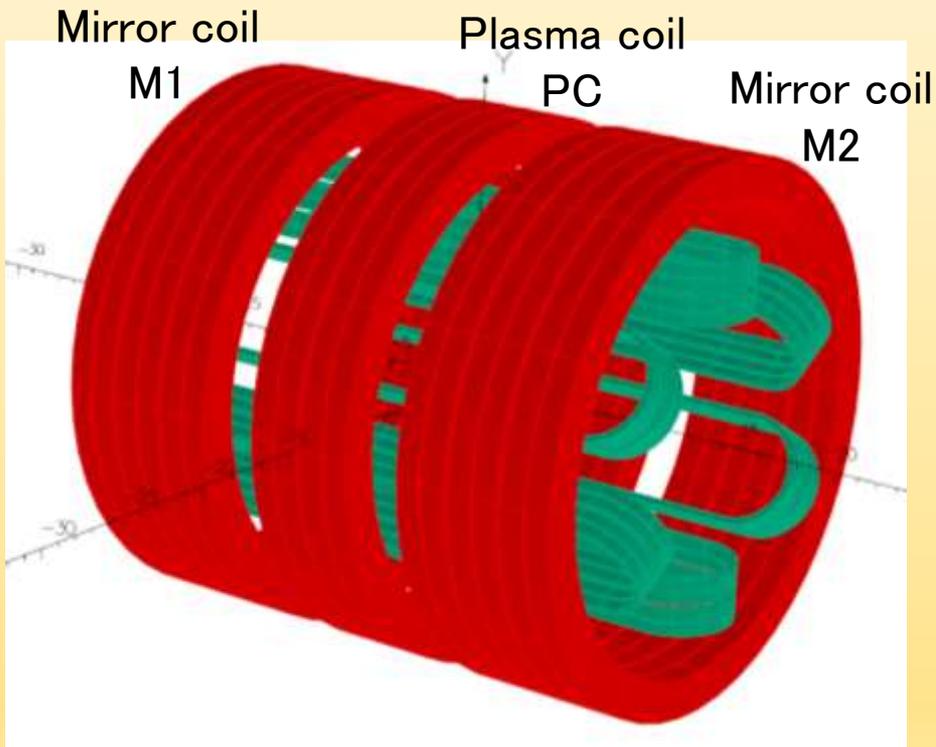
## 高強度低速ミュオンビーム



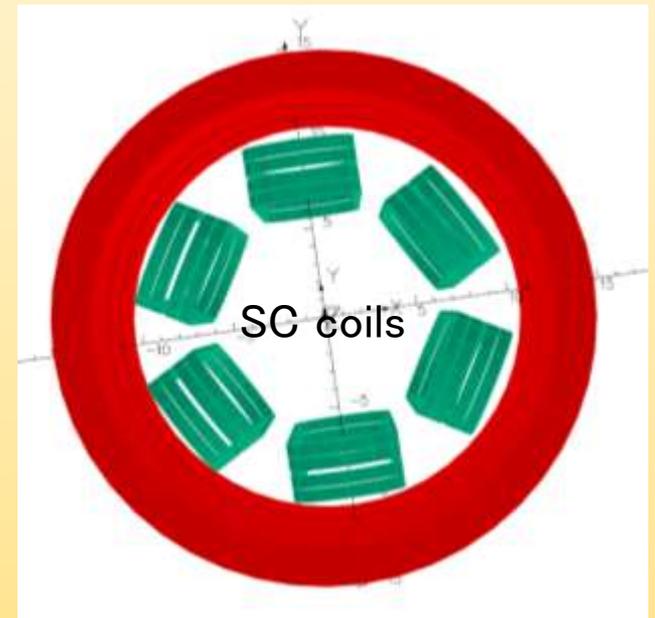
# 要素技術開発の一例:

## 10 GHz HTS-ECR イオン源 ミラーコイルと六極コイル

Mirror coils of circular type



Sextupole coils of race-track type

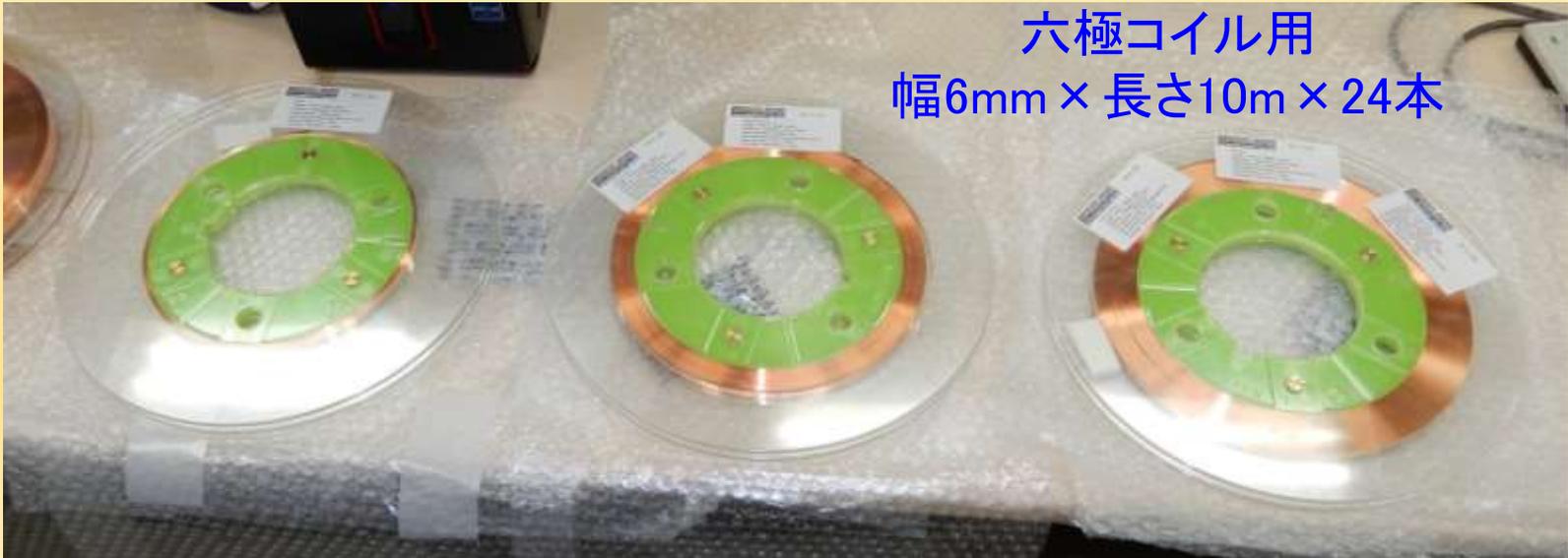


# 10 GHz HTS-ECRコイル用REBCO線材

ミラーコイル & 補助コイル用  
幅12mm × 長さ35m × 16本



六極コイル用  
幅6mm × 長さ10m × 24本



# まとめ

- 『安心・安全・スマートな長寿社会実現のための高度な量子アプリケーション技術の創出』を目指した産学共創プログラムOPERAがH29年度からスタート(H33年度まで)
  - ・半導体デバイスのソフトウェア評価技術
  - ・アルファ線核医学治療による進行がん治療技術
- 量子アプリを支える加速器・照射技術の高度化が進行中
  - ・既存のRCNPサイクロトロン施設のアップグレード  
イオン源、AVFサイクロトロン、白色中性子源、  
CWミューオン源
  - ・空芯型高温超伝導コイルを用いた高強度小型多機能スケルトンサイクロトロンの設計・要素技術開発

# (研究開発課題 1) H31年度の研究組織と参加者

- ・ 大阪大学  
福田光宏、依田哲彦、神田浩樹、安田裕介、中尾政夫、友野大、黒澤真城、羽原英明、原周平、HuiWen Koay、森田泰之
- ・ 東北大学  
伊藤正俊、松田洋平
- ・ 早稲田大学  
石山敦士
- ・ 北海道大学  
野口聡
- ・ 岡山大学  
植田浩史
- ・ 新潟大学  
福井聡
- ・ 量研高崎研  
石岡典子、百合庸介、倉島俊、宮脇信正
- ・ 高エネルギー加速器研究機構  
三宅康博
- ・ 住友重機械工業 (株)  
松原雄二、三上行雄、鶴留武尚、高橋伸明、吉田潤、平山貴士、江原悠太
- ・ (株) 京都メディカルテクノロジー  
高橋成人、小菅喜昭
- ・ 中部電力 (株)  
長屋重夫、渡部智則
- ・ シヤチハタ(株)  
旭野欣也、上谷謙二、石川宏敏
- ・ ニチコン(株)  
森威男、川口祐介、津野真仁