

# スケルトン・サイクロトロン開発のための 高温超電導コイルの要素技術開発

WE0002

電磁石と電源 口頭発表

2020年9月2日 15:30-15:50

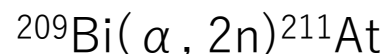
久松 万里子(発表者), 福田 光宏, 依田 哲彦, 神田 浩樹, 中尾 政夫, 安田 裕介, 友野 大, Koay Hui Wen  
森田 泰之, 武田 佳次郎, 原 隆文, 大本 恭平, 荘 俊謙 (大阪大学核物理研究センター), 石山 敦士  
(早稲田大学理工学術院), 野口 聡 (北海道大学大学院情報科学研究科), 植田 浩史 (岡山大学大学  
院自然科学研究科), 福井 聡 (新潟大学大学院自然科学系), 鎌倉 恵太 (東京大学原子核科学研究セ  
ンター), 松原 雄二, 三上 行雄, 鶴留 武尚, 高橋 申明, 吉田 潤, 平山 貴士 (住友重機械工業)  
長屋 重夫, 渡部 智則 (中部電力)

1. 研究背景-研究開発課題
  - スケルトン・サイクロトロン開発の概要
  - スケルトン・サイクロトロンの要素技術開発
  - 高温超伝導 10 GHz ECRイオン源の開発
  
2. 高温超伝導ECRイオン源開発
  - ミラーコイル, セクターコイルの設計
  - イオン源内部の磁場分布シミュレーション
  
3. 実験
  - 六極コイルの性能試験
  - 再現性の確認
  
4. まとめ・今後の展望

# 研究開発課題

アルファ線核医学治療の研究開発:

短寿命アルファ線放出核種 $^{211}\text{At}$ ( $t_{1/2}$  7.2h)の多量生産



実用化に求められる条件

安全・安定 (病院での使用も想定)

再現性・即時性・操作性

多量 (医師主導治験にはGBq単位の線量が必要)

数百  $\mu\text{A}$ 以上のおの大強度 $^4\text{He}$ ビーム(28~40 MeV)

## 目標

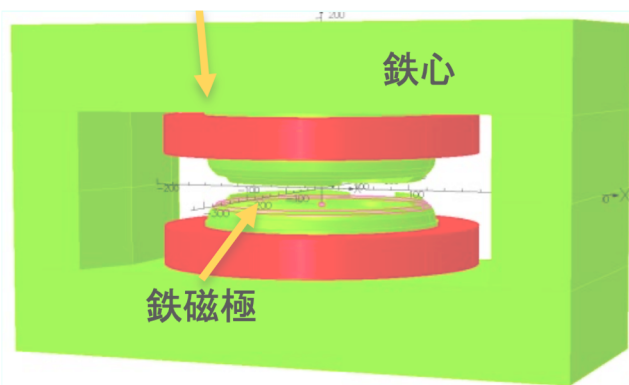
Heイオン源の高輝度化

小型サイクロトロンの高強度化・多機能化・汎用化・省エネ化

小型中性子源の開発

**専用の小型加速器の開発**

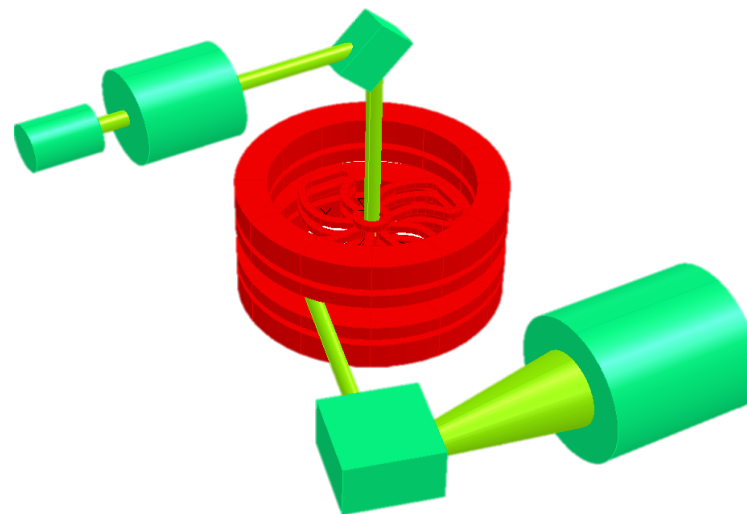
空芯小型多機能加速器

スケルトン・サイクロトロン<sup>1</sup>の要素技術開発

## 従来のAVFサイクロトロン

(室温コイル, 鉄心, 鉄磁極)

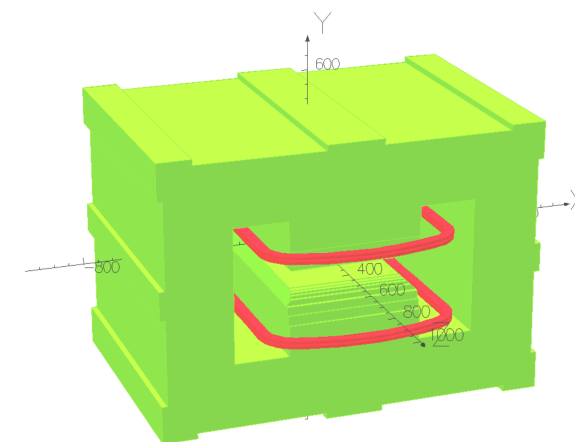
- 消費電力 大, 磁場強度 2T 程度
- 鉄の温度変化によるビーム安定性△
- 運転パラメータの再現性△



## スケルトン・サイクロトロン

(高温超電導コイル, 空芯)

- REBCO線材の複数のコイルを組み合わせ,  
加速に必要な高磁場・高精度磁場を形成
- 内部の空間的自由度が高い
  - 高い再現性
  - 臨界温度が高く安定

BSCCO線材を使用したコイルは  
実現済 (2019, 鎌倉恵太(CNS))

1170 mm × 610 mm

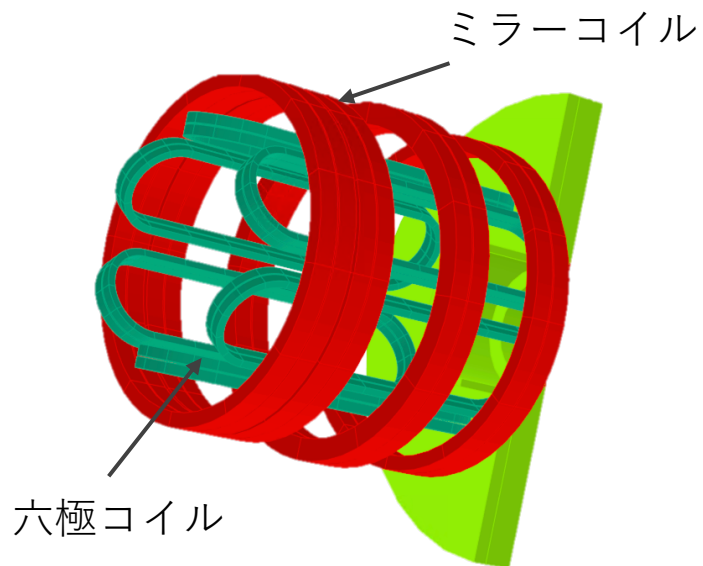
300 A @20K

# 小サイズでの円形-非円形コイル性能評価

ECRイオン源の開発により, 円形コイル・非円形コイルの組み合わせの性能評価試験

## 高輝度ヘリウムイオン源

ミラーコイル (円形コイル)  
六極コイル (非円形コイル)

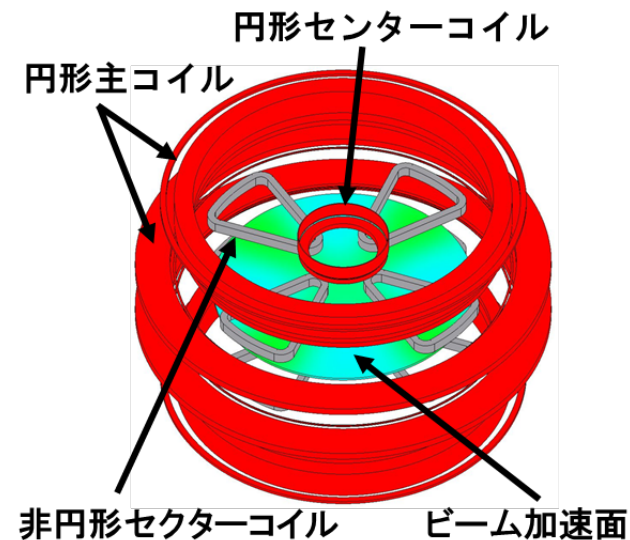


半径：~ 10 cm

スケールアップ

## スケルトンサイクロトロン

メインコイル (円形コイル)  
センターコイル (円形コイル)  
セクターコイル (非円形コイル)



引き出し半径：50 cm

(設計一例) 最大平均磁場：2.589 T,  ${}^2\text{D}^+$  40 MeV  
( ${}^{211}\text{At}$ 製造には 1.732 T,  ${}^4\text{He}^{2+}$  36 MeV)

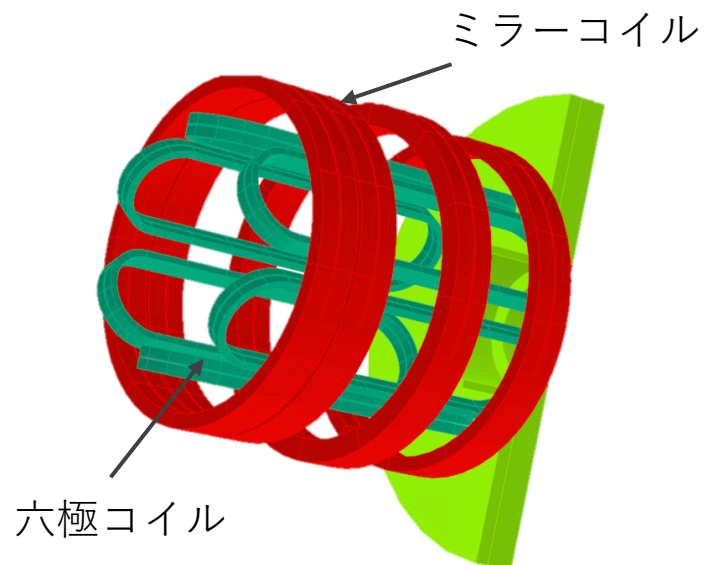
# 高温超伝導 10 GHz ECRイオン源の開発

ECRイオン源の開発により, 円形コイル・非円形コイルの組み合わせの性能評価試験

## 高輝度ヘリウムイオン源

ミラーコイル (円形コイル)

六極コイル (非円形コイル)



半径: ~ 10 cm

## REBCO高温超伝導線材を使用

外部磁場に強く, 通常の超電導よりも安定  
液体窒素冷却での実験が可能

ミラーコイル, 六極コイルの設計ならびに 六極コイルの製作完了  
[線材]

素材  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (臨界電流 150A~@77 K(自己磁場中))

超伝導体と補強材、メッキ、コーティングを含み厚さ100  $\mu\text{m}$ 程度

- ミラーコイル 12 mm幅 (より大きなコイル電流を通電可能)

- 六極コイル 6 mm幅

空芯小型多機能加速器

# スケルトン・サイクロトロン of 要素技術開発

REBCO線材の仕様(Super-Ox Japan LLC)

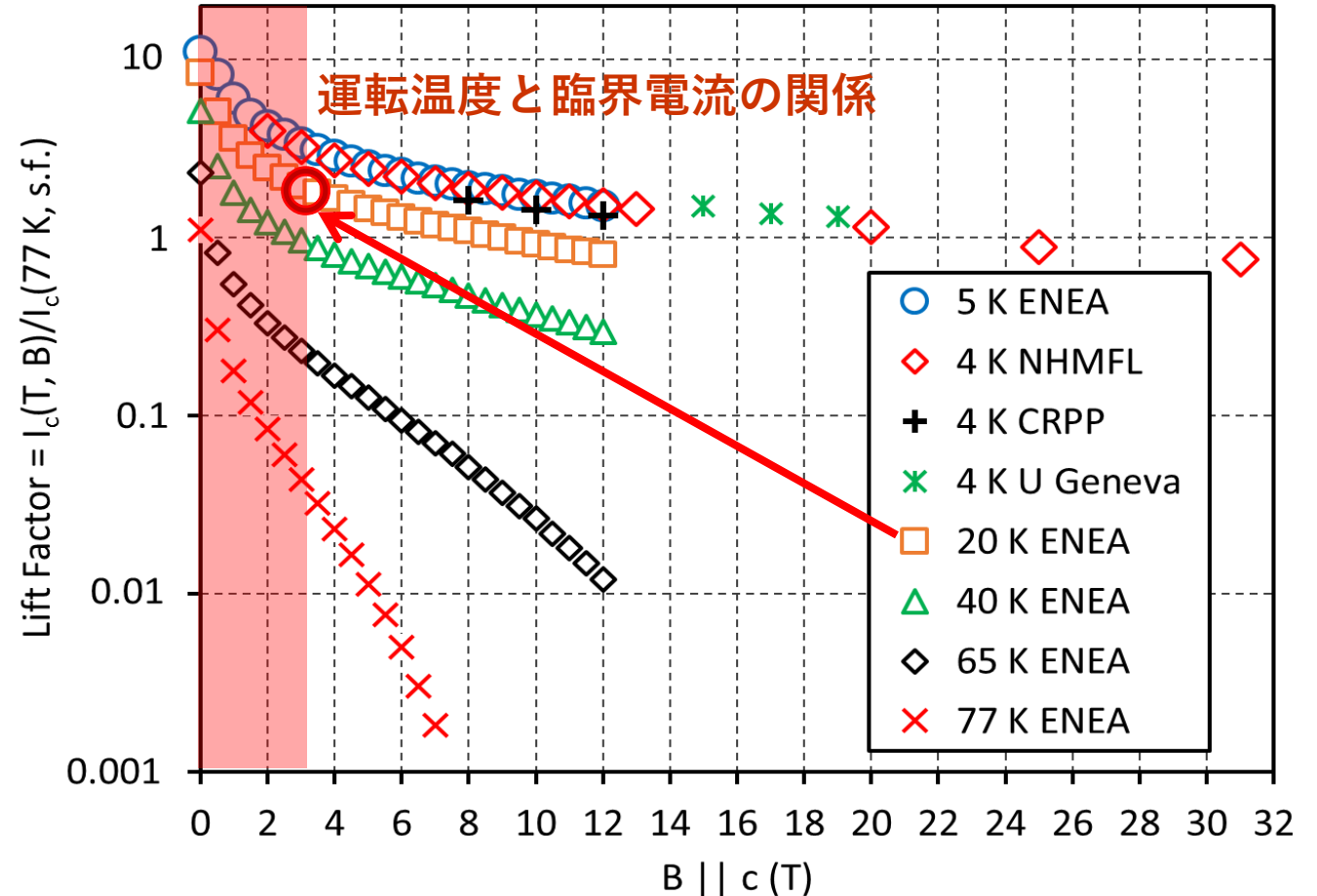
REBCO(希土類金属・バリウム・銅酸化物)化合物をベースとした第二世代高温超電導線材を使用

6 mm幅コイル：

lift factor = 1.8 @20 K, 3.5 T

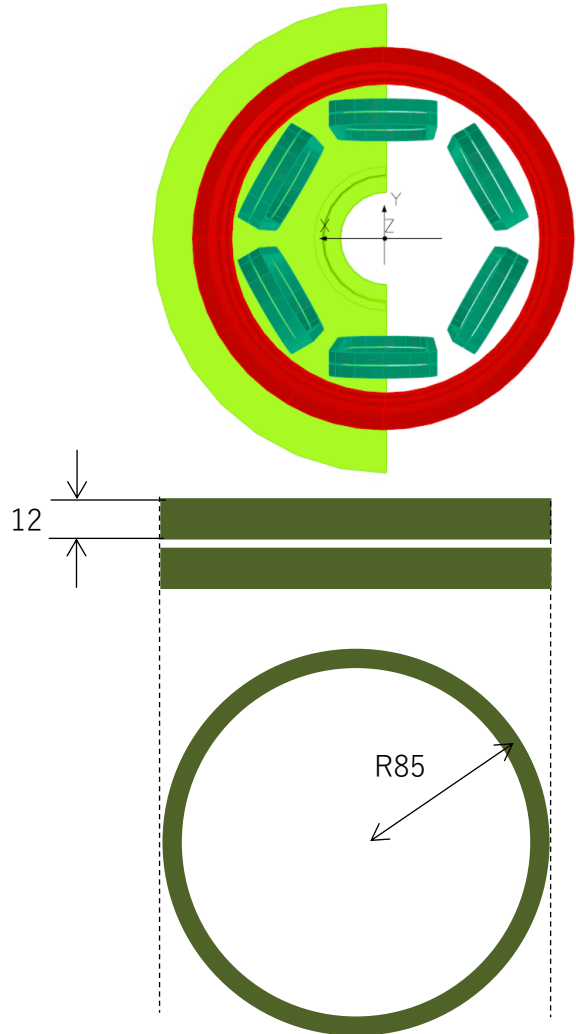
lift factor = 1.4 @30 K, 3.5 T

まだ実用化されていない

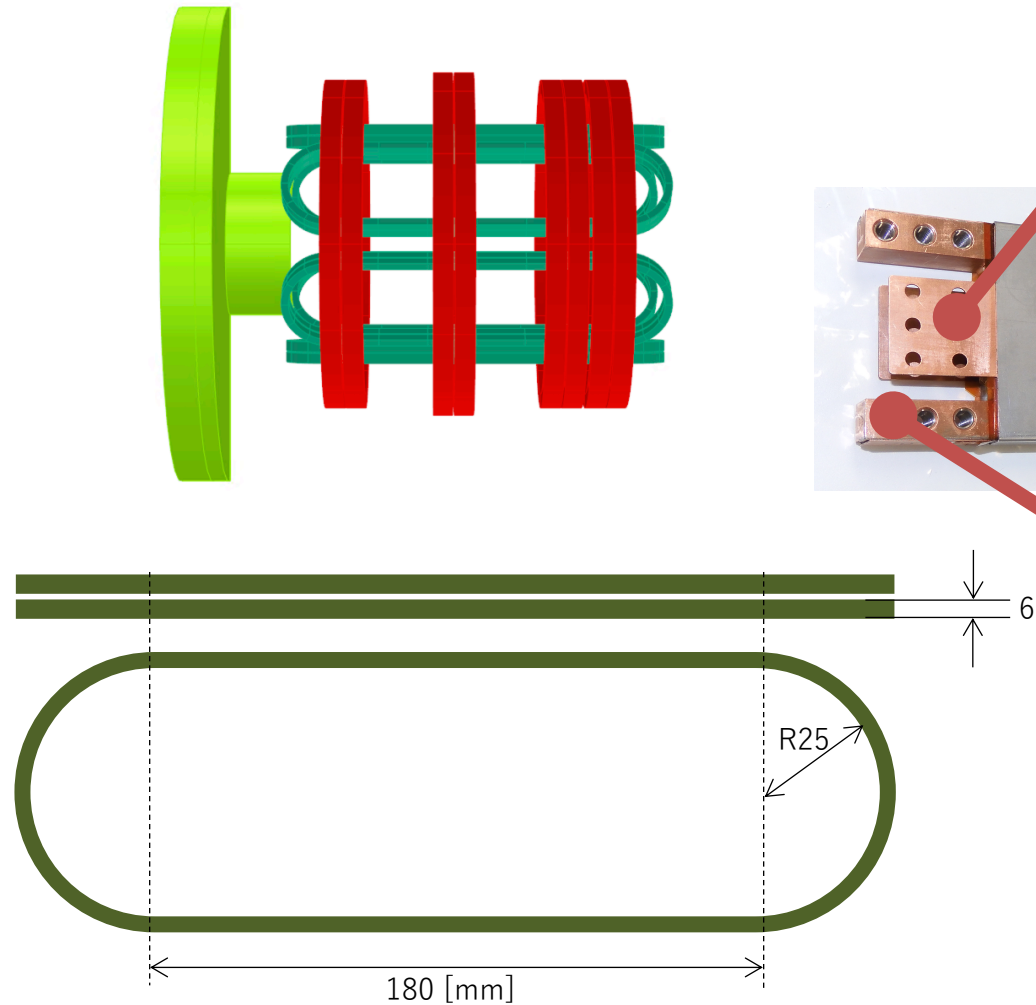


# 高温超伝導 10 GHz ECRイオン源の開発

ミラーコイル (製作中)



六極コイル (製作済)

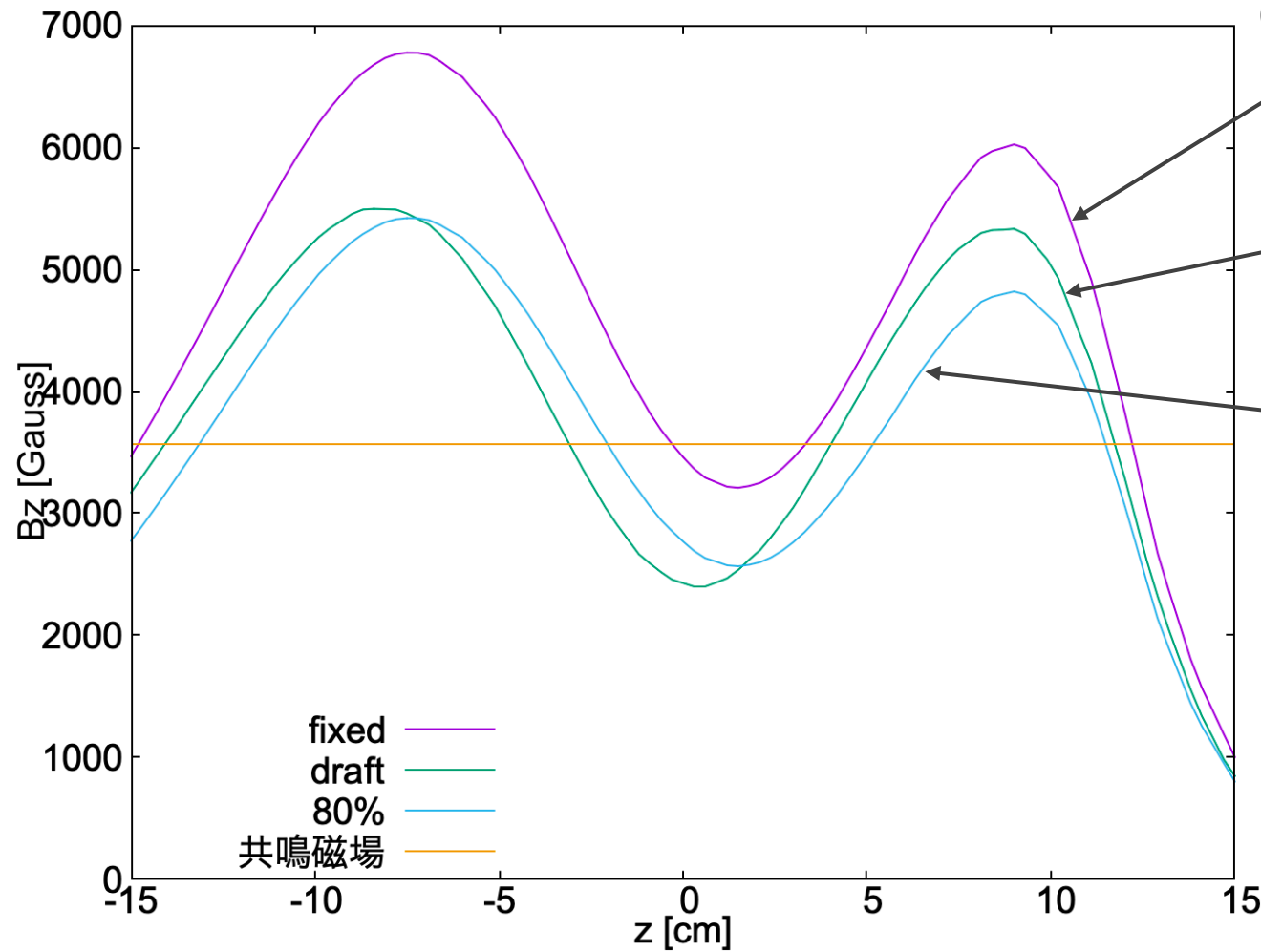
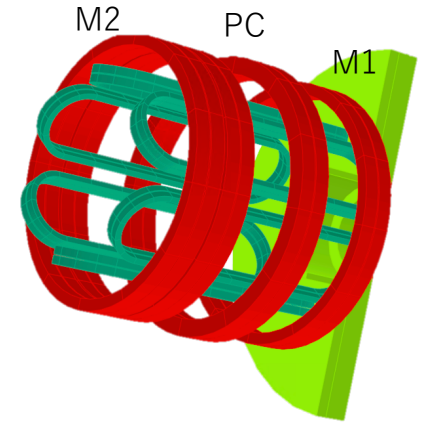


冷却板

電流導入端子



# 軸方向の磁場分布



コイル機械設計後の仕様で再計算  
(当初設計と同じ電流値)

目標値

- M1 -304 A
- PC 480 A
- M2 -416 A
- 六極コイル 150 A

コイル機械設計後の仕様で再計算  
(当初設計の80%の電流値)

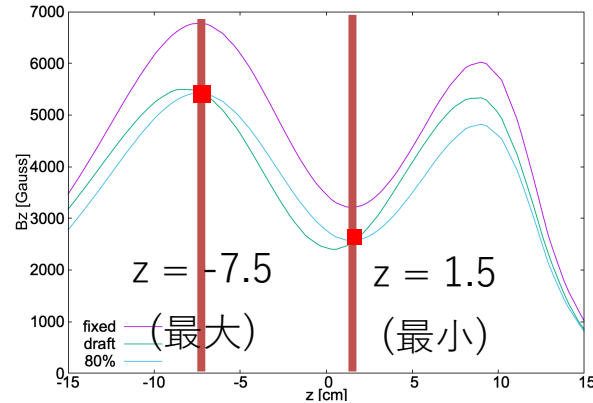
六極コイル製作後, 実際のパラメータ (各所の長さや電流密度) でシミュレーション

必要とされる電子共鳴磁場 (3.57 kG@10 GHz) , および設計通りの最小約2.8 kG程度の磁場を形成できることが計算上確認された。

実際の運転では引き出しビームの量と質が向上するようミラー磁場, 六極磁場を調整する。

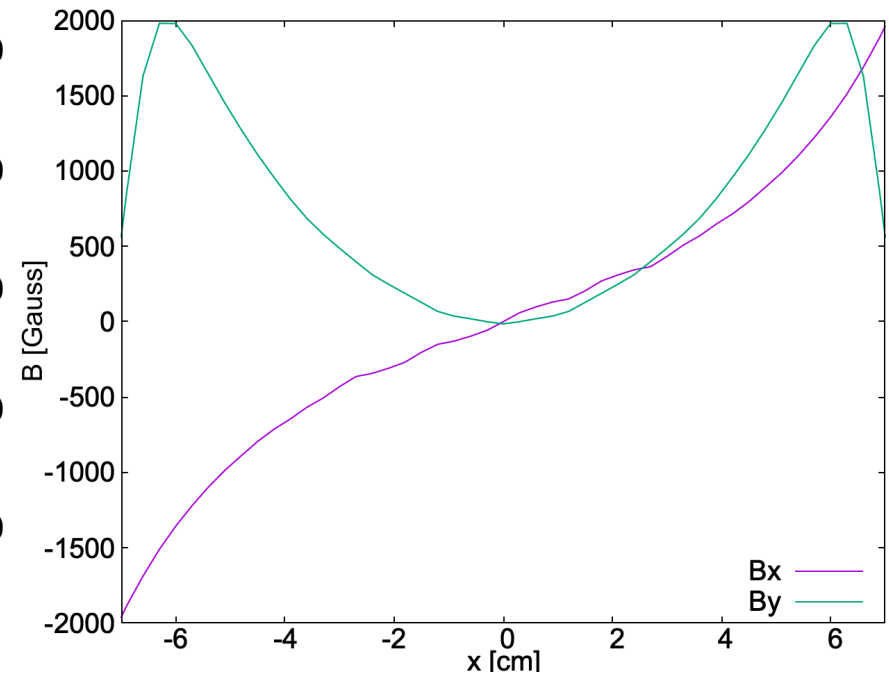
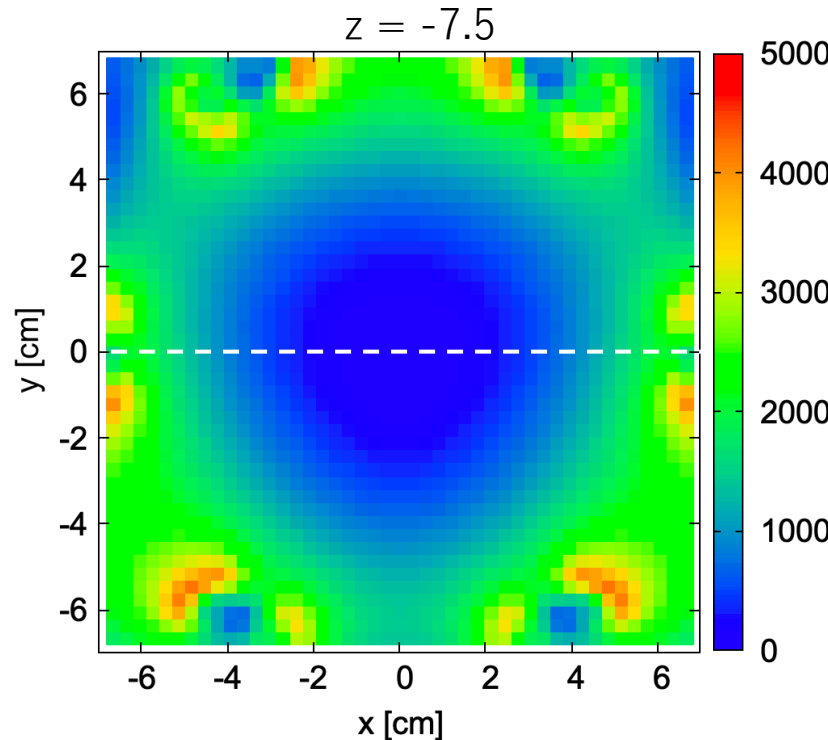
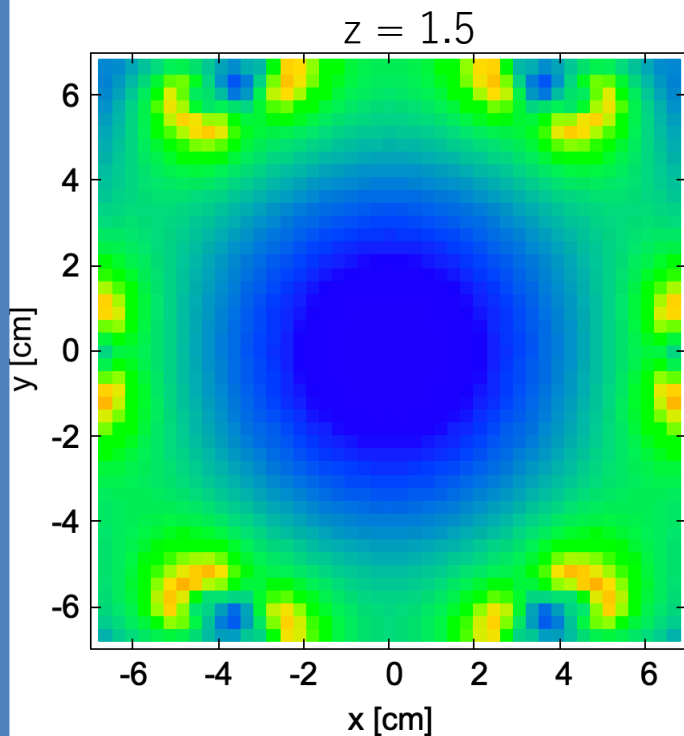
Opera 3Dを用いた中心軸沿いの磁束密度の計算値

# 中心軸に垂直な断面の磁場強度分布



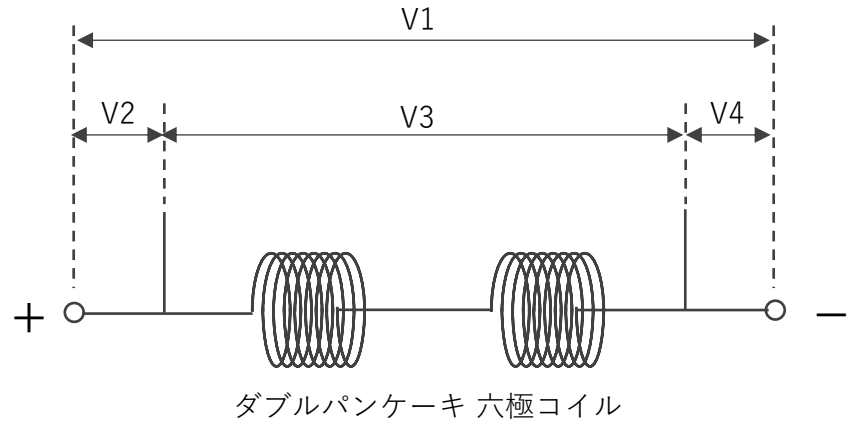
中心軸沿いの磁場が最大となる点, 最小となる点での断面において磁場強度を計算した.

イオン/電子のいる領域として中心からコイル付近まで設計時の通りの ECR イオン源として運用できる見込みがあるか確認した.



z = -7.5でのx軸沿いの磁場

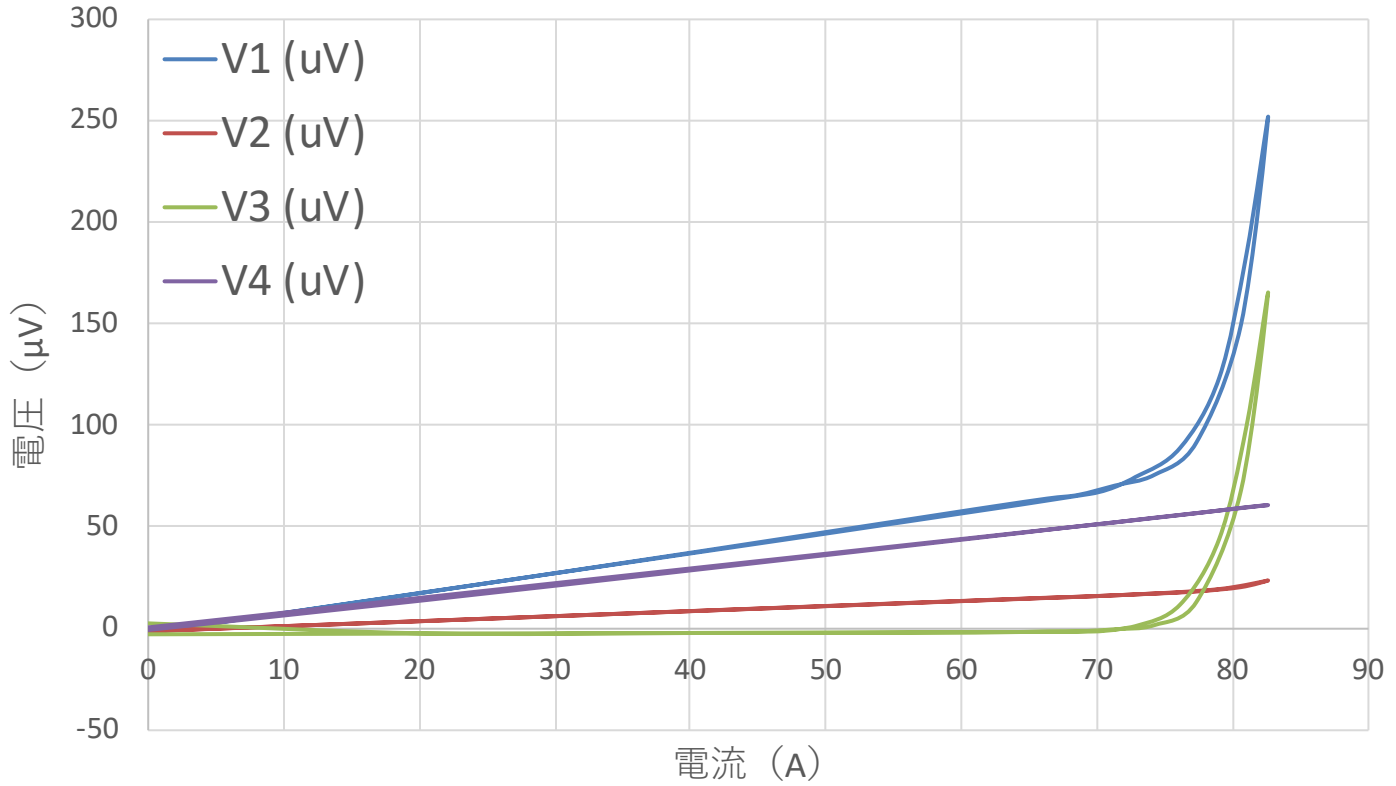
# 六極コイルの性能試験



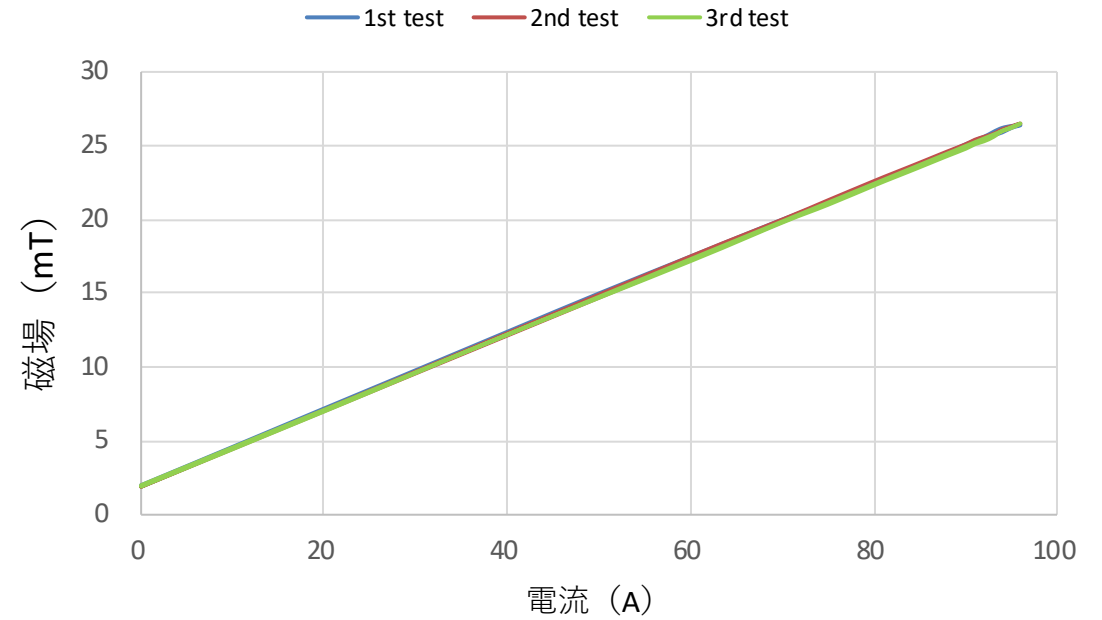
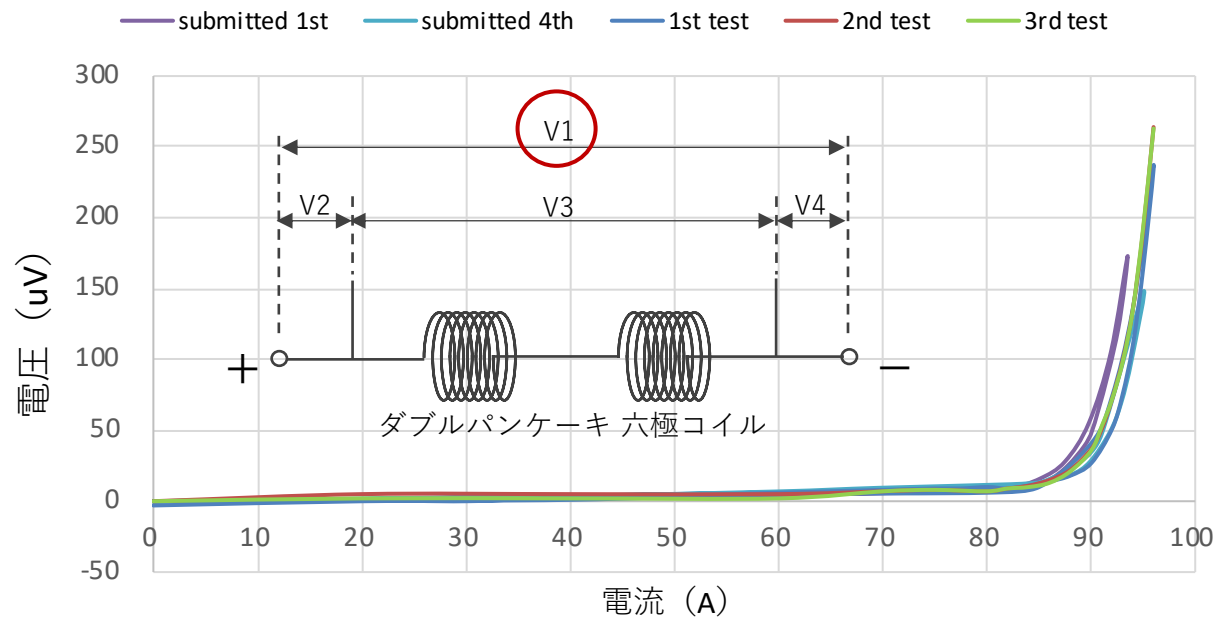
製作した六極コイルを液体窒素で77 Kまで冷却  
 0 ~80 A程度まで電流を流し、コイルに発生する電圧を測定.

(電流を減らす方向についても同様に測定)

- 実際の巻線後の臨界電流  $I_c$  70~80A@77K  
 (実用では20~30 Kまで冷却予定)



# 再現性の確認



六極コイル中心部から4 cmの位置で計測(誤差0.1mT程度)

1つのコイルについて製作工場 (@羽衣電機) にて4回, その後RCNPにて3回. 計7回の冷却試験.

RCNPでの実験では発生する磁場の計測も行なった.

複数回での試験において磁場はほぼ変化なく発生し,  
**励磁による劣化は確認されなかった.**

## まとめ

- ・ アルファ線核医学治療法の研究開発のため高温超伝導スケルトン・サイクロトロン (HTC-SC) のコイル開発を実施
- ・ HTC-SC開発に際し, 高温超電導円形コイル及び非円形コイルの要素技術開発として 10 GHz ECRイオン源用ミラーコイル及びレーストラック型六極コイルを開発. REBCO 線材を用いたミラーコイルと六極コイルを製作し, 基本性能評価試験を実施中
- ・ 六極コイルについて液体窒素冷却でのI-V特性と磁場強度を測定
- ・ 測定の結果, コイルの状態では臨界電流がおよそ80 A@77 K, 複複数回の励磁でも端子間電圧及び発生磁場の再現性は良く、コイル性能に劣化がないことを確認

## 今後の展望

- ・液体窒素温度での六極コイル及びミラーコイルの単体性能試験
- ・液体窒素温度での複数の六極コイルやミラーコイルを組み合わせた状態での性能試験
- ・ミラーコイルや六極コイルをクライオスタットに収納し, 20~30 Kまで冷却した状態での基本性能試験
- ・プラズマチェンバー内の電場設計, 及びイオンビームの引き出し電極設計

ECRイオン源開発を通してREBCO線材での円形コイル, 非円形コイルを組み合わせた磁場形成の実用性を確認し, より大きいスケールであるスケルトン・サイクロトロンへの実装を目指す.

※本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(JST、OPERA、JPMJOP1721)の支援を受けて実施しました。