

高温超伝導コイルを用いた スケルトン・サイクロトロン 電磁石の設計研究

大阪大学核物理研究センター 福田光宏、植田浩史、
畑中吉治、依田哲彦

早稲田大学理工学術院 石山敦士、王旭東

中部電力株式会社電力技術研究所 長屋重夫、渡部智則

北海道大学大学院情報科学研究科 野口聡

日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所

横田渉、倉島俊、宮脇信正

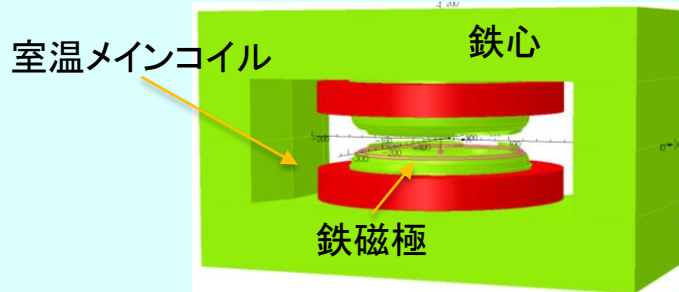
Contents

1. 背景と目的
2. スケルトン・サイクロトロン¹の諸元
3. RCNPにおけるこれまでの高温超伝導
コイル開発
4. スケルトン・サイクロトロン²電磁石設計
の現状
5. まとめ

1. 背景と目的

サイクロトロン課題と解決に向けた開発

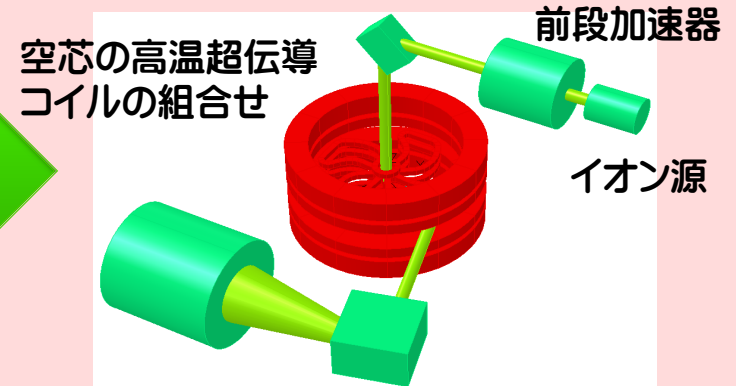
従来のAVFサイクロトロン



【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】

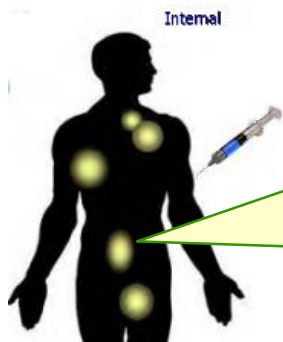
- ★高温超伝導コイルを採用
→臨界温度が高く、マージンが大
→省電力で、高磁場を発生
→磁場強度は室温に依らず安定
- ★空芯型サイクロトロン(世界初)
→磁場強度の再現性に優れ、運転が簡単
→コンパクトで省スペース、内部機器の配置が自由、ビームの高強度化が可能

核医学診断・治療用RI供給の課題

★加速器を用いた診断・治療用RIの大量生産と安定供給

●アルファ線内用療法●

- ・ α 線放出核種で標識／合成した物質を投与し、がん細胞へデリバリー
- ・飛程の短い α 線により、がん細胞のみをピンポイント照射
- ・周辺臓器への侵襲がないため、初診時進行がんにも有効



患者さんは病院で加療

適応疾患

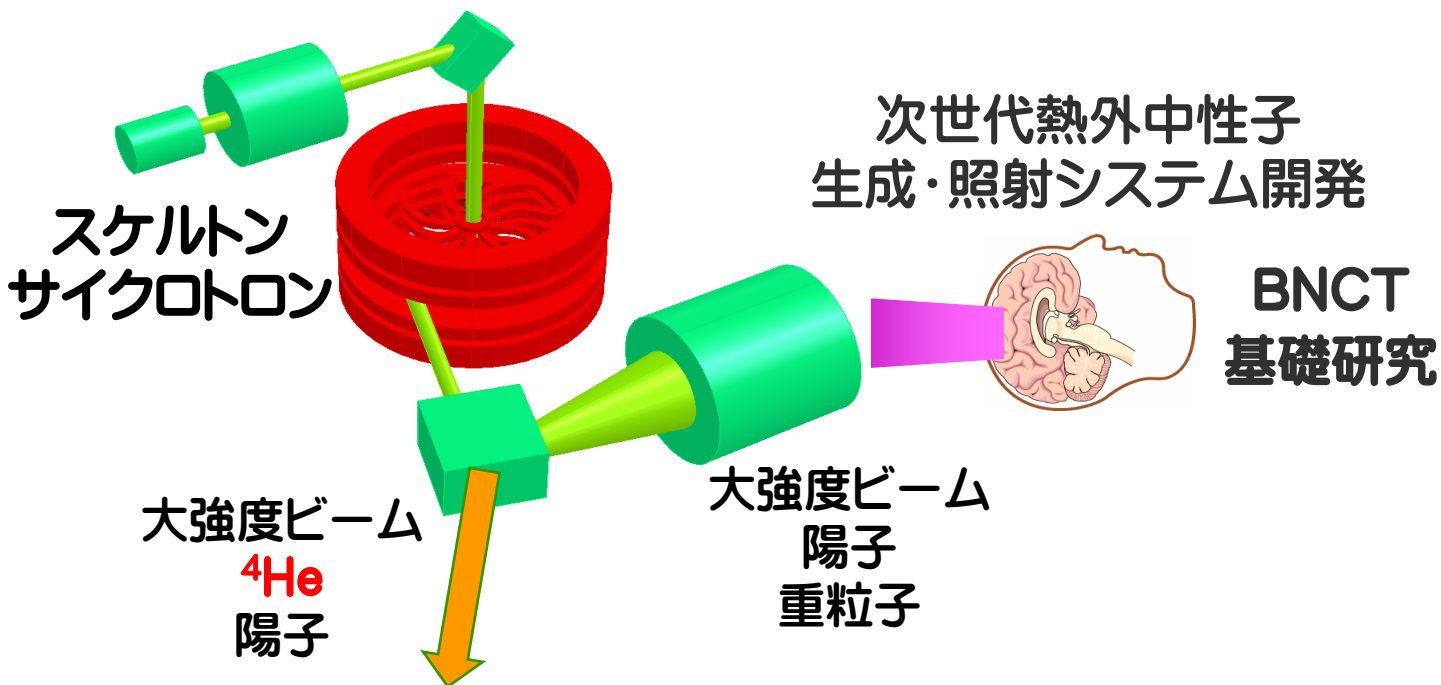
多発転移がん
浸潤がん

α 線放出核種とエネルギー

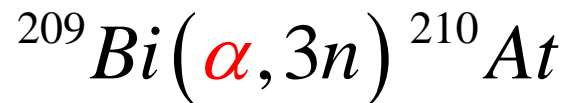
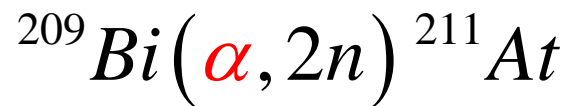
RI	$T_{1/2}$	a-ray energy (MeV)
Tb-149	4.2 h	4.0
Bi-212	61 min	8.8
Bi-213	46 min	8.4
At-211	7.2 h	6.8
Ra-223	11.4 d	5.8
Ra-224	3.66 d	5.8
Ac-225	10 d	5.9

【目的】 医学・医療応用を目指した スケルトン・サイクロトロンの開発

高強度小型サイクロトロン開発



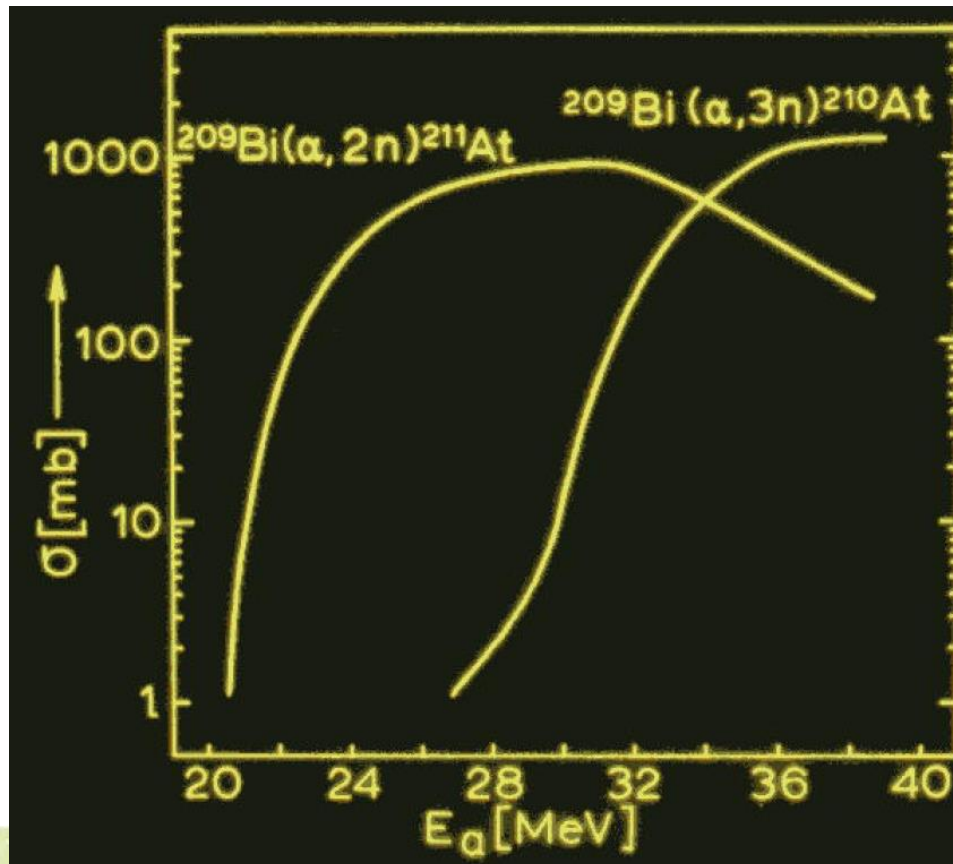
核医学診断・放射線治療用
RIの大量生産
特に・・・At-211



2. スケルトン・サイクロトロン の諸元

At-211 / At-210の生成に必要な条件

- ^{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 $^4\text{He}^{+1/2+}$ 28MeV
※mA級の大強度 ^4He ビームを加速

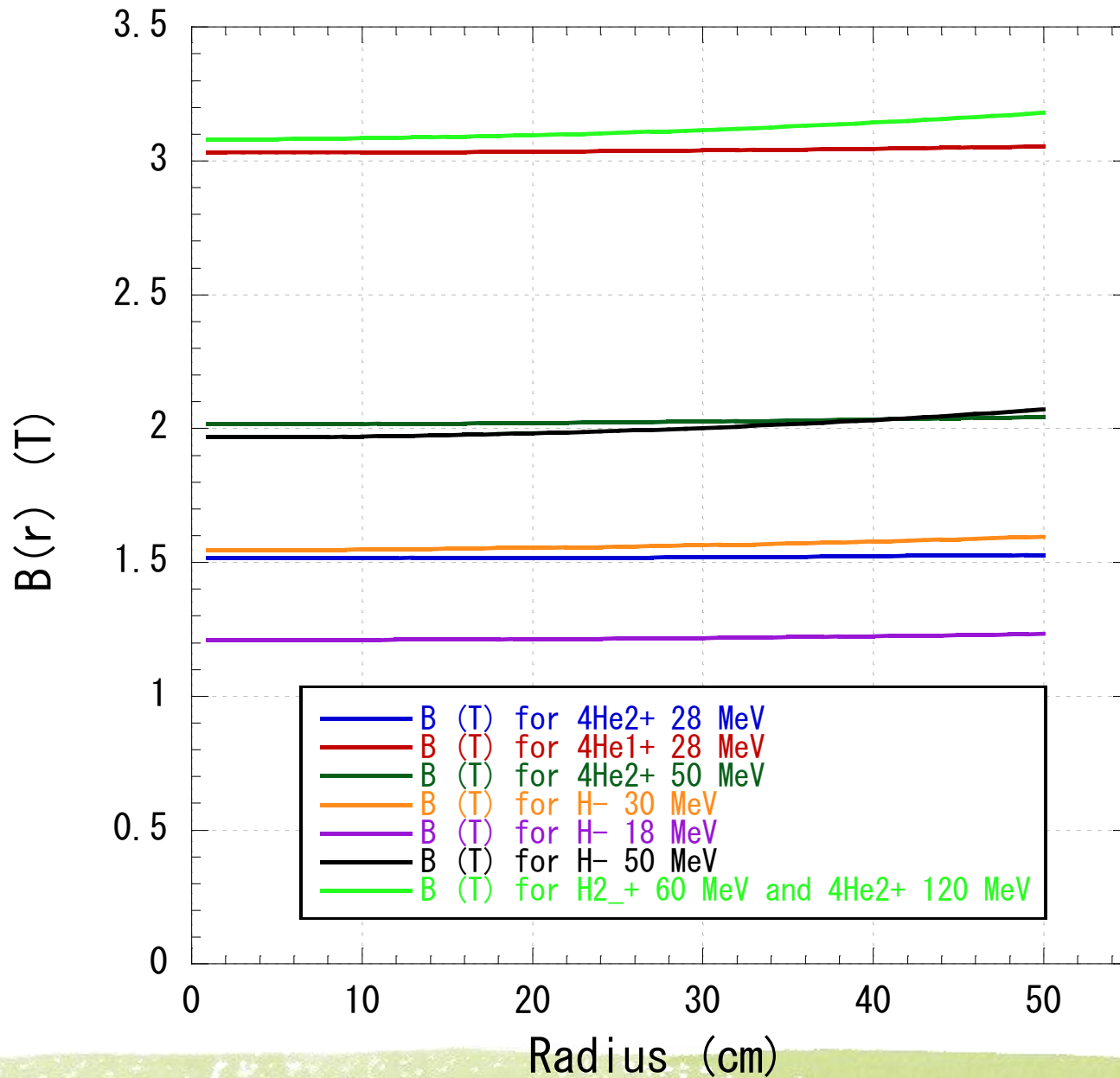


スケルトン・サイクロトロンのパラメータ

- ・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
$^4\text{He}^+$	28	3.053	3.030	46.537	4	^{211}At α -therapy
$^4\text{He}^{2+}$	28	1.526	1.515	46.540	4	^{210}At α -therapy
$^4\text{He}^{2+}$	50	2.043	2.016	30.960	2	^{210}At γ -SPECT
H^-	18	1.232	1.209	36.856	2	PET-CT
H^-	30	1.596	1.546	47.140	2	BNCT, ^{99}Mo - ^{99m}Tc
H^+	50	2.071	1.966	29.969	2	^{99}Mo - ^{99m}Tc

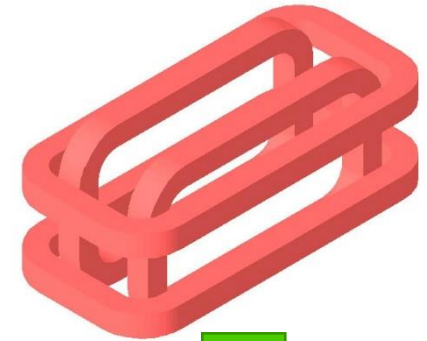
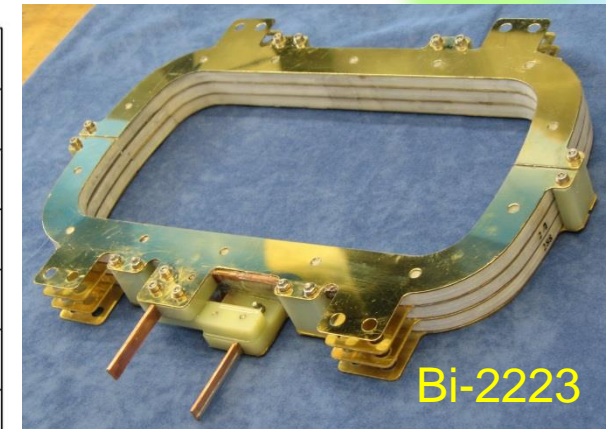
主な加速粒子の等時性磁場



3. RCNPIにおけるこれまでの 高温超伝導コイル開発

HTS Scanning Magnetの要素開発

Coils	Inner size	B_x : 150 mm × 300 mm, B_y : 150 mm × 380 mm
	Cross section	30 mm × 30 mm
	Separation	70 mm
	Max. field	0.6 T
	Superconductor	Bi-2223/Ag alloy wire
	Total length	B_x : 412 m × 2, B_y : 460 m × 2
	Number of turns	420 × 2 coils for both B_x and B_y
	Winding construction	3 double pancakes/coil
	Inductance of single coil	B_x : 75mH, B_y : 92 mH
	Critical current at 77 K	40-43 A
	Rated current	200 A
	Operating temperature	20 K
Cryostat	Cooling method	Conduction cooling by two GM refrigerators
	Thermal insulation	Vacuum isolation, 80 K shield, super-insulation
	Cooling power of the GM refrigerator	45 W at 20K, 53 W at 80 K



K. Hatanaka, J. Nakagawa, M. Fukuda, T. Yorita, T. Saito, Y. Sakemi, T. Kawaguchi, N. Noda, "A HTS scanning magnet and AC operation", Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A, Vol.616, pp.16-20 (2010)

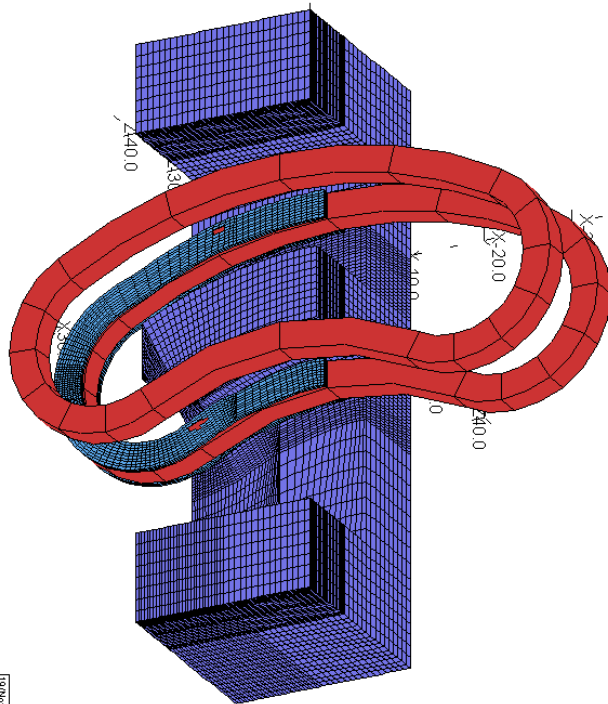
HTS Dipole magnetの要素開発

【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 # : $4 = 2 \times 2$

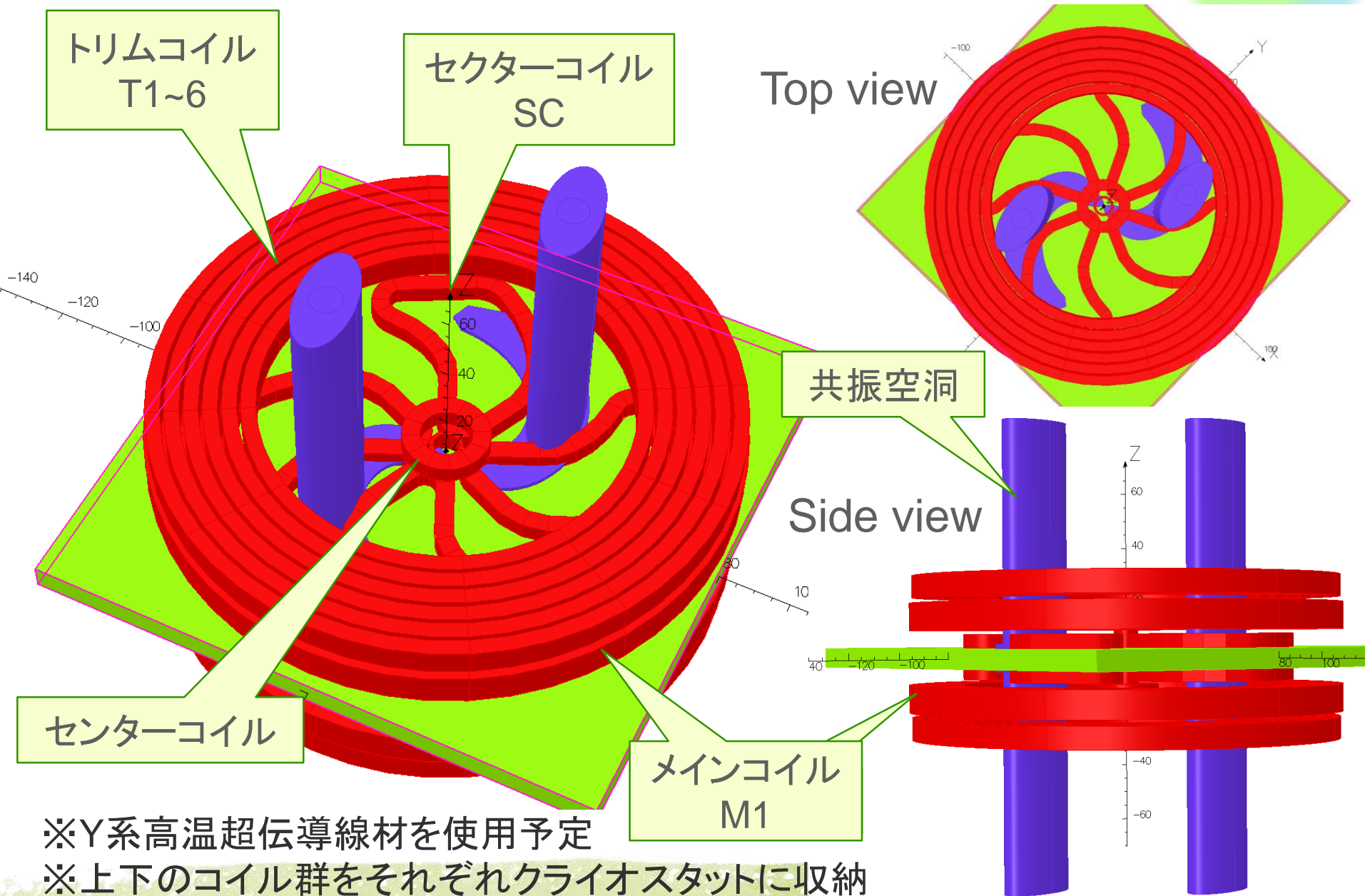
Operating temperature : < 20 K

Operating current : < 200 A



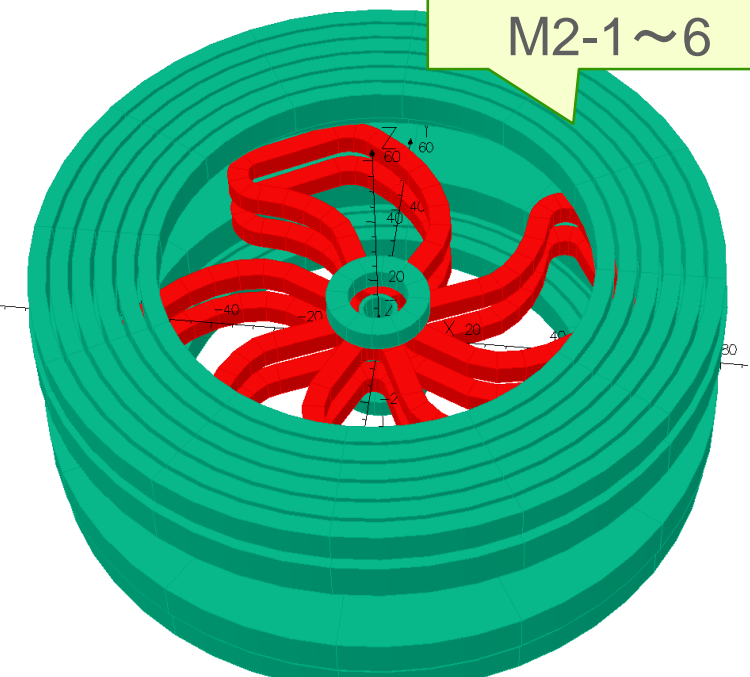
4. スケルトン・サイクロトロン 電磁石設計の現状

スケルトン・サイクロトロン



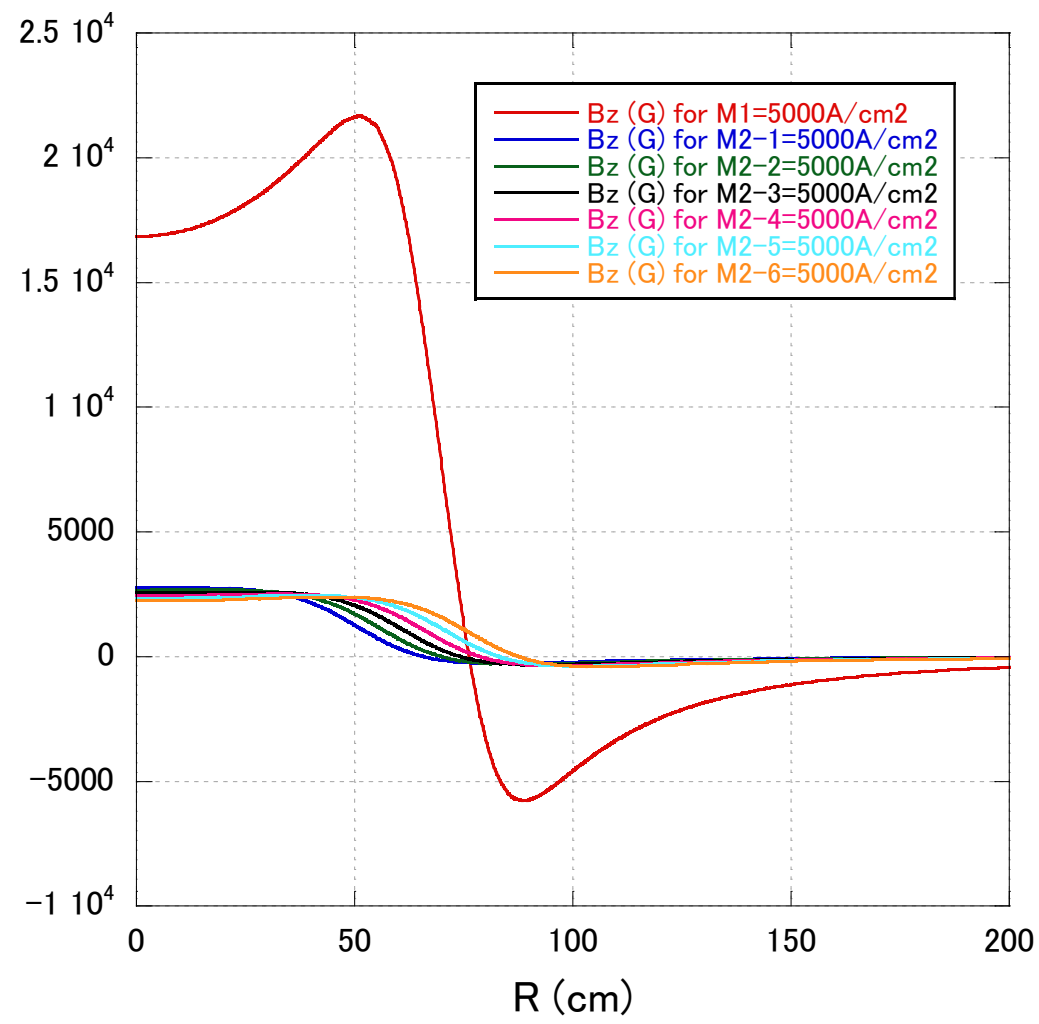
メインコイル&トリムコイル磁場分布

トリムコイル
M2-1~6



Bz (G)

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

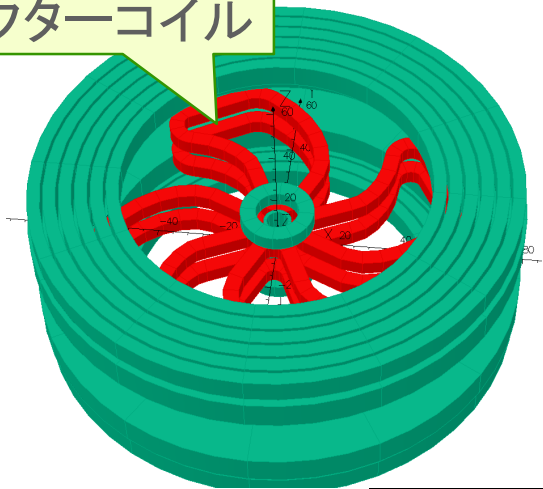


メインコイル
M1

トリムコイル
M2-1~6

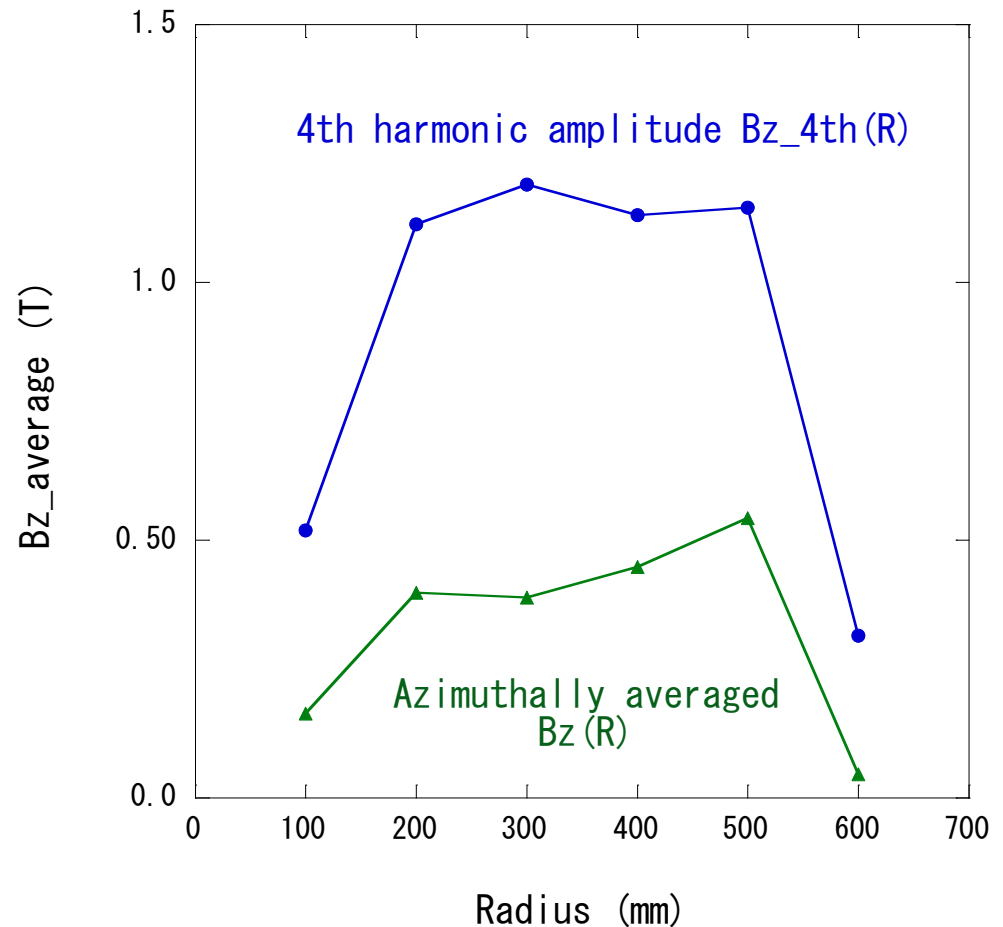
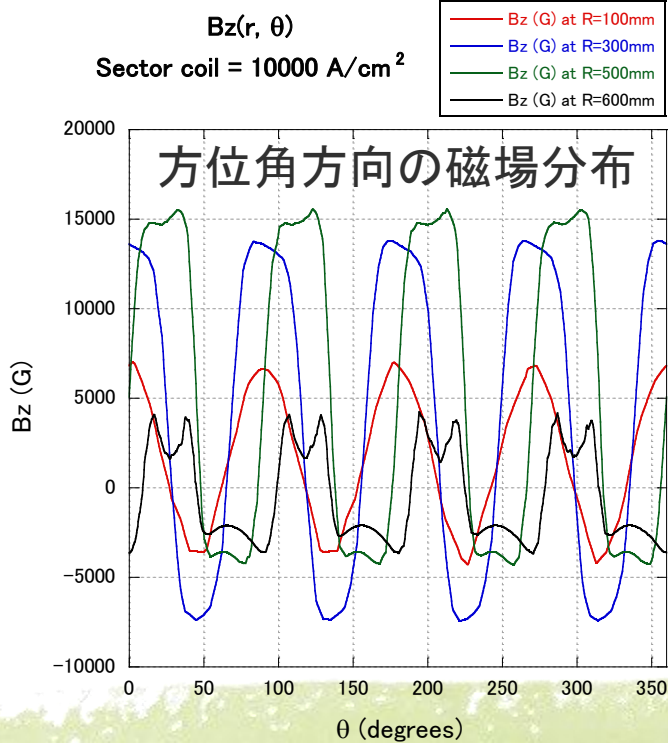
セクターコイル磁場分布

セクターコイル



※セクターコイルのみに10,000A/cm²通電
(~210 A/HTS-tape)

方位角方向の平均磁場と4回対称磁場強度

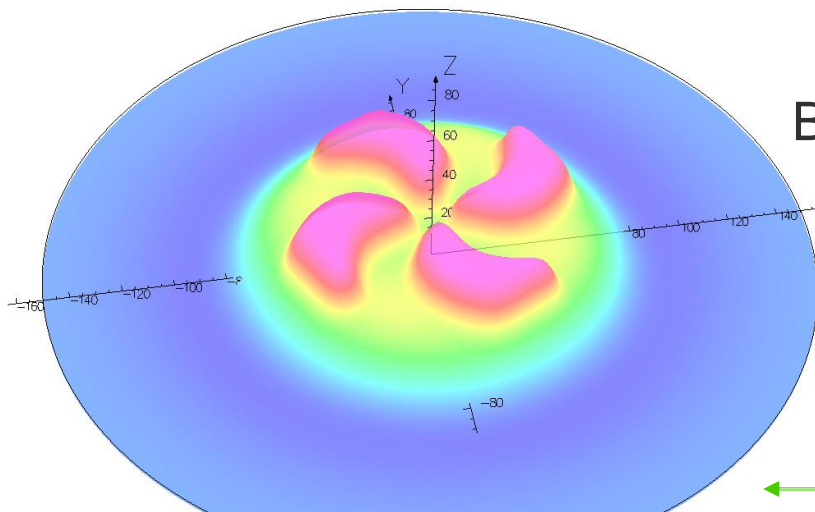


メイン&トリム&セクターコイル合成磁場分布の例

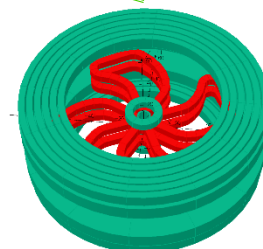
コイル電流

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

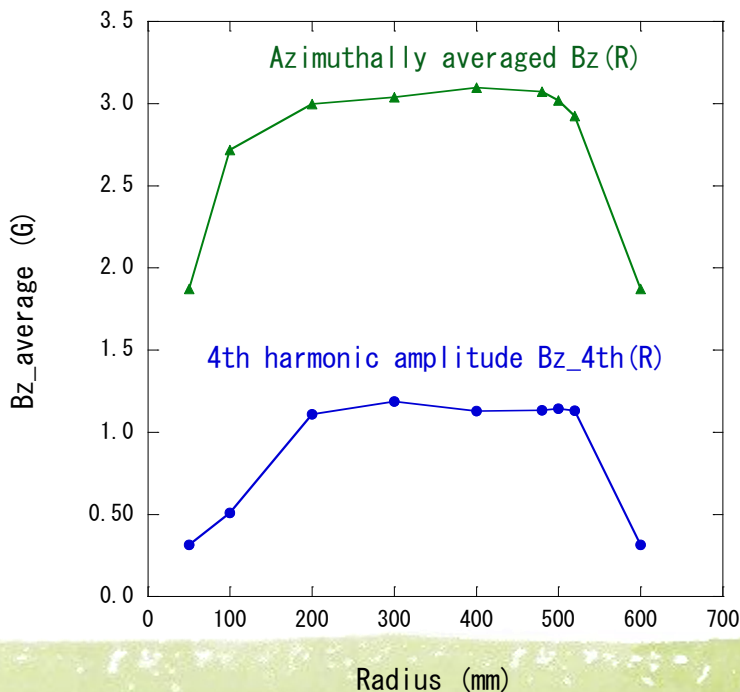
Map contours: Bz
4.048572E+004
3.500000E+004
3.000000E+004
2.500000E+004
2.000000E+004
1.500000E+004
1.000000E+004
5.000000E+003
0.000000E+000
-5.203583E+003
Integral = 2.136427E+008



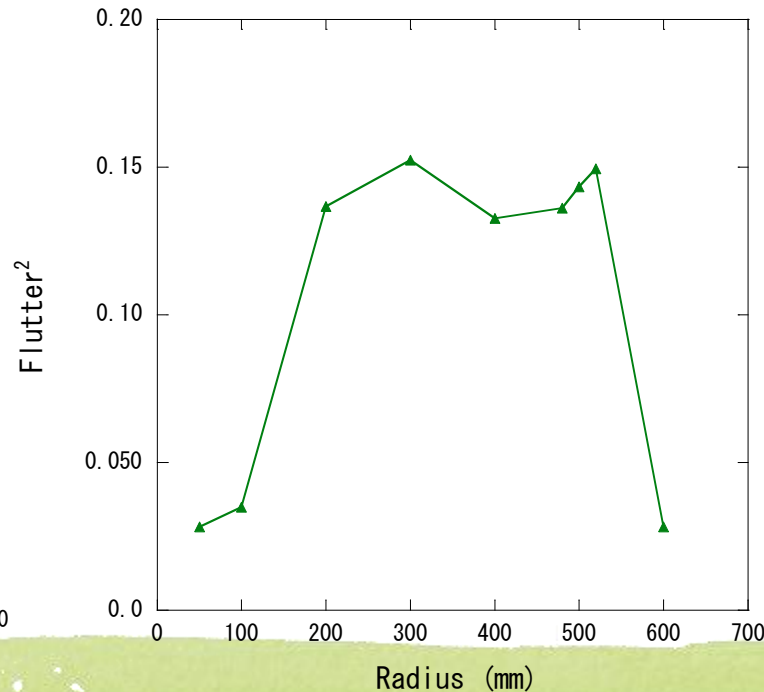
Bz(r,θ)分布



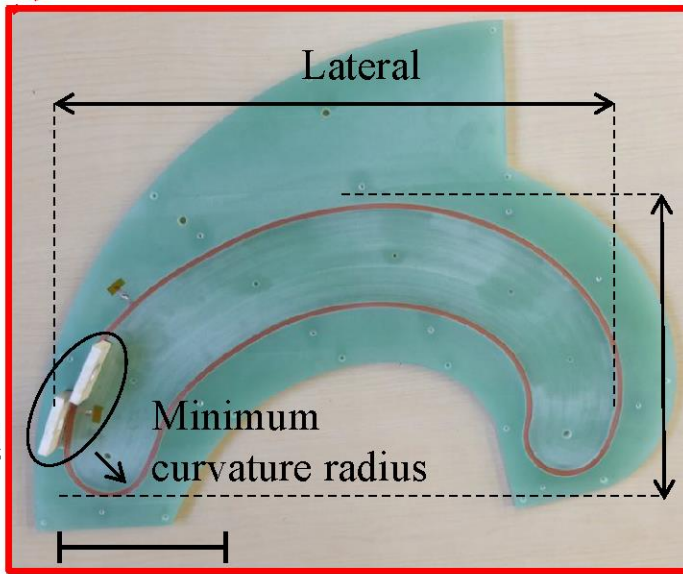
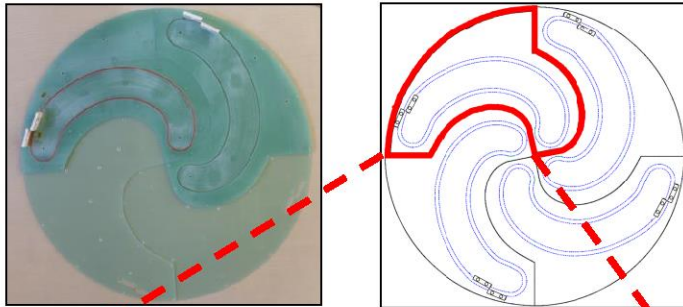
平均磁場と4回対称磁場強度



フラッター F²



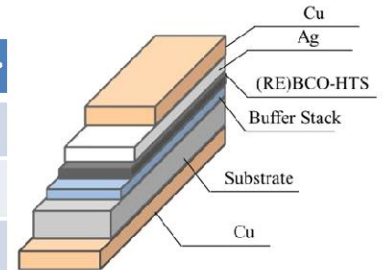
セクターコイルの試作 (早稲田大学、中部電力)



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 $\frac{1}{4}$
 → $\frac{1}{2}$

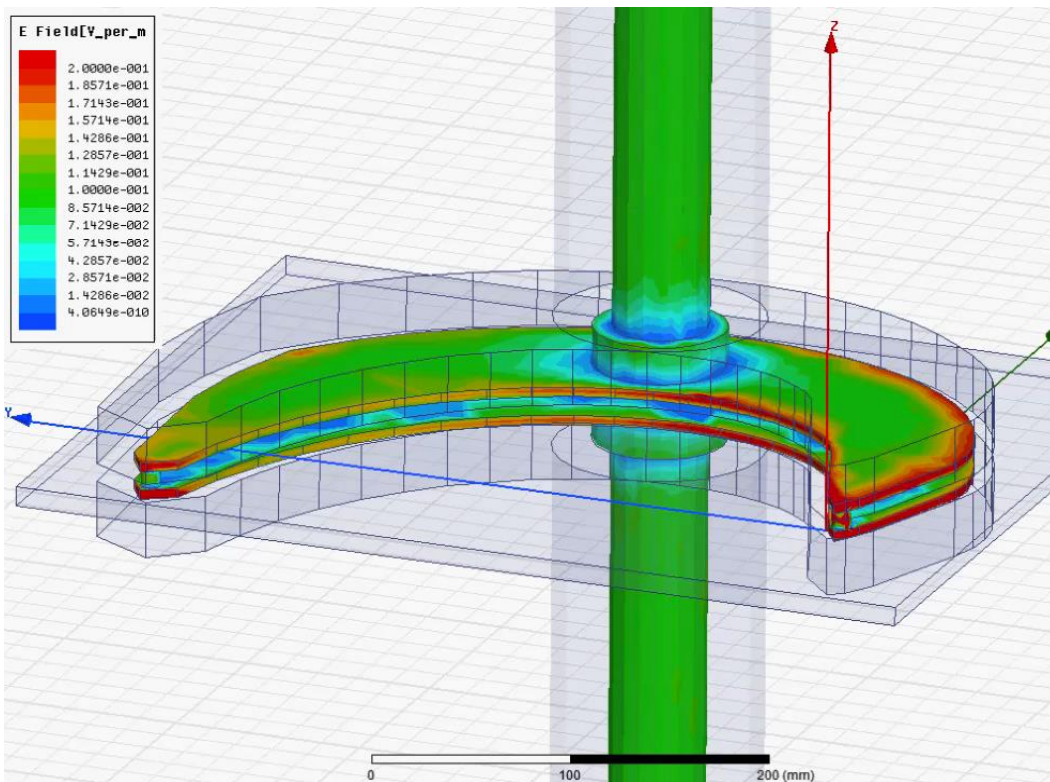
大きさ: **約4分の1**, 最小曲率半径: **2分の1**のモデルコイルを試作

共振空洞の設計

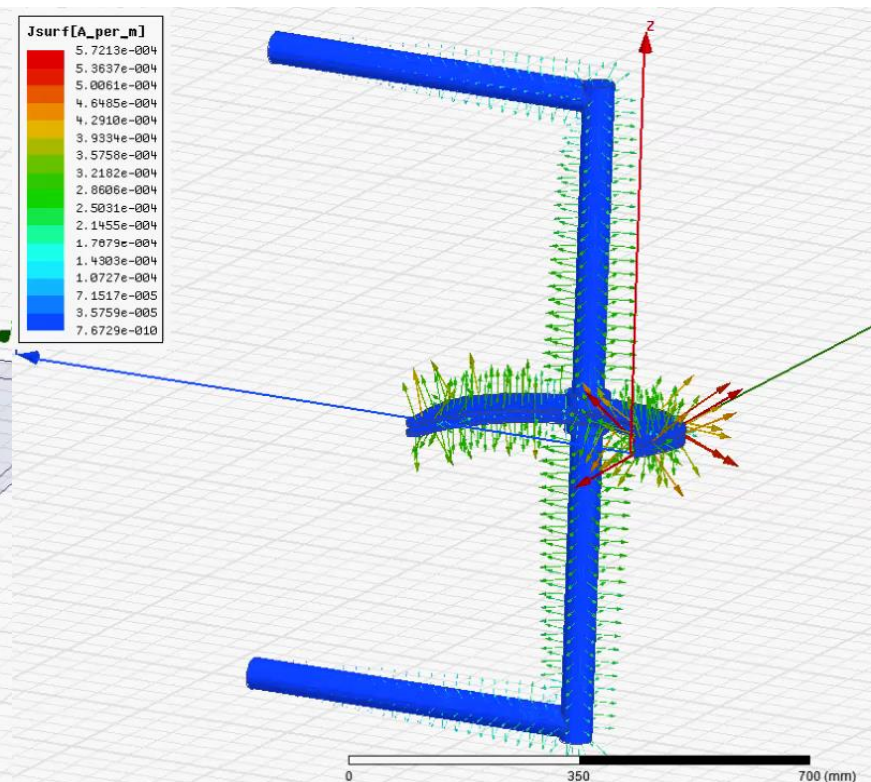
● Model condition

- 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. 高温超伝導“スケルトン・サイクロトロン”の特徴

- ・鉄心を用いない空芯型高温超伝導コイル群から構成
メインコイル、トリムコイル、セクターコイルなど
- ・高温超伝導コイルは臨界温度が高く、クエンチに対するマージンが大きい
- ・磁場の再現性や励磁の迅速性が向上
→加速イオン種・エネルギーの迅速切り替えが可能
- ・機器配置の自由度が向上
→共振空洞、入射・引出機器、ビーム診断機器など

2. スケルトン・サイクロトロンの実証機としてRI製造を想定した小型サイクロトロンの設計が進行中

- ・核医学診断・治療用RI (At-211/210など) を生成
- ・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