

第19回日本加速器学会年会

陽子線がん治療向け
超電導AVFサイクロトロンのコミッショニング

江原 悠太（住友重機械）

・住友重機械工業



加速器



超電導



極低温冷凍機

・加速器事業開始から50年

1972～ 研究向け加速器

1981～ PETサイクロトロン

1988～ 炭素線治療向け入射器

1996～ 陽子線治療システム

2009～ BNCTシステム

K140AVFサイクロトロン（大阪大学RCNP）



PET



BNCT



重粒子線治療用ライナック



内用療法



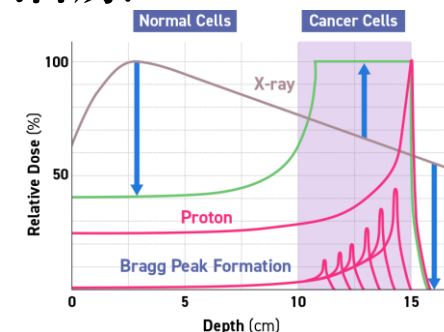
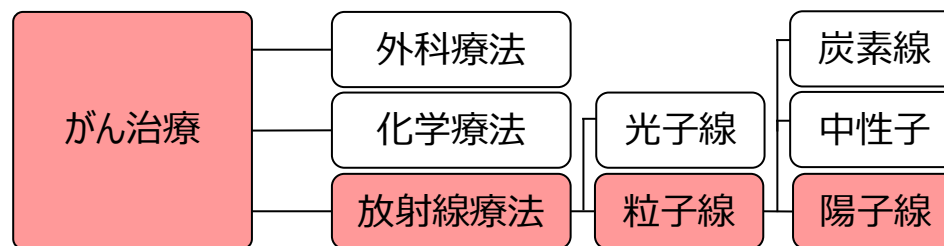
陽子線治療システム



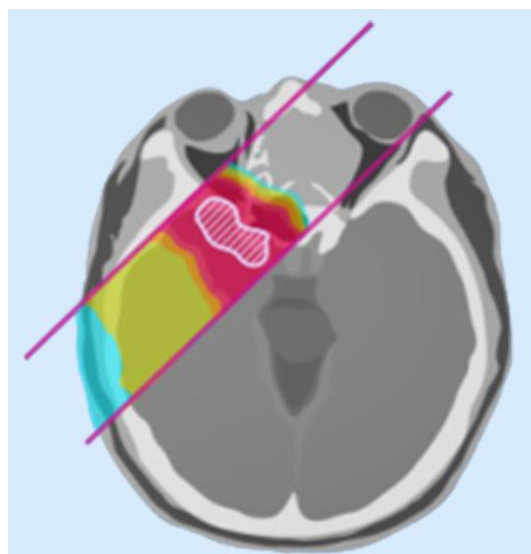
- 陽子線治療
- 超電導サイクロトロンの開発
 - 陽子線治療向けAVFサイクロトロン
- コミッショニング試験
 - 中心領域、加速領域、ビーム引出しの様子
 - ビーム性能

QOL ; Quality Of Life (生活の質)

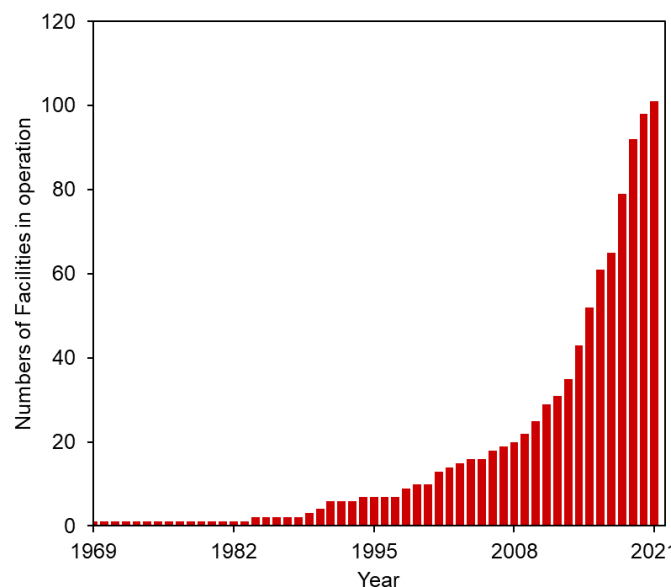
・陽子線治療は患者のQOLを維持するがん治療



陽子線治療における線量分布



全世界の陽子線治療施設



日本における
保険適用範囲の拡大

2016年5月～

- ・小児腫瘍
- ・骨軟部腫瘍
- ・前立腺がん
- ・頭頸部悪性腫瘍

2022年4月～

- ・肝細胞がん
- ・肝内胆管がん
- ・膵臓がん
- ・大腸がん術後局所再発

陽子線治療は患者に優しいがん治療、期待は大きい。

当社の陽子線治療システム



新設用地・費用が大きく導入可能な病院は限定される。
加速器も大型なコンポーネントの一つである。

- ・近年、相次いで超電導加速器が開発されている。



Varian's ProBeam

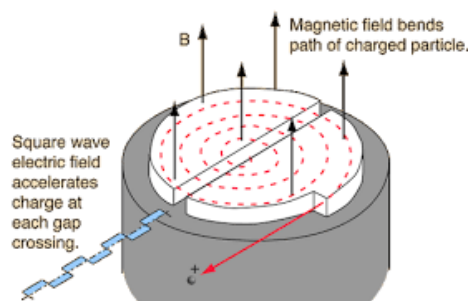


MEVION's S250



IBA's Proteus ONE

- ・超電導マグネットで高磁場を発生させ、加速器を小型化

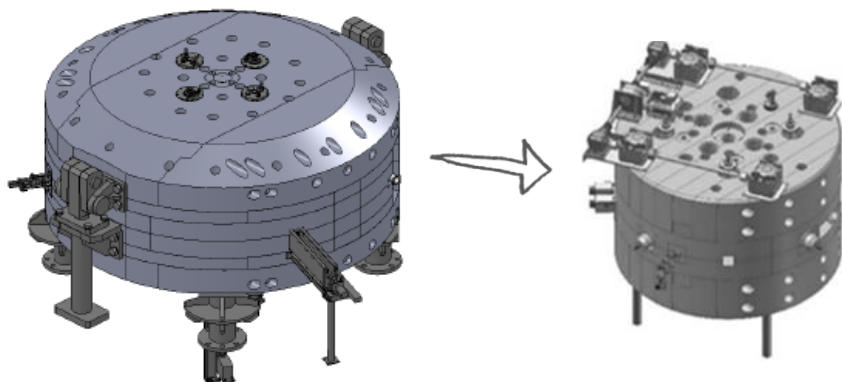


$$\rho = \frac{mv}{qB}$$

ρ : 軌道半径
 B : 磁場
 m : 質量
 v : 速度
 q : 電荷

小型化を狙った超電導加速器が開発されている。

- 陽子線治療向けの超電導AVFサイクロトロン



従来機 (P235)

開発機 (SC230)

項目	従来機	開発機
重量	220 t	65 t
直径	4.3 m	2.8 m
高さ	2.1 m	1.7 m

項目	従来機	開発機	従来機比
重量	220 t	65 t	0.3 倍
消費電力	330 kW	<200 kW	0.6 倍
最大ビーム電流	300 nA	1000 nA	3.3 倍

「小型・省エネ・大電流」なサイクロトロンが開発された。

H. Tsutsui, et al. (2013)

・ 主要な仕様



開発機 (SC230)

項目	仕様
ビームエネルギー	233-237 MeV
最大ビーム電流	≥ 1000 nA
ヨーク直径	2.8 m
ヨーク重量	65 t
起磁力	1 × 10 ⁶ AT/coil
引出半径	0.6 m
システム全消費電力	< 200 kW

・ 特徴的な設計を採用

・ セクター形状

- ・ 大きなスパイラルアングル (最大約70deg)
- ・ 狭いギャップ (最小±6mm)

・ Dee電極

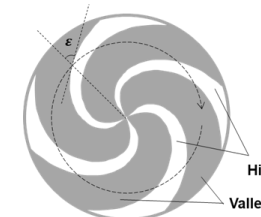
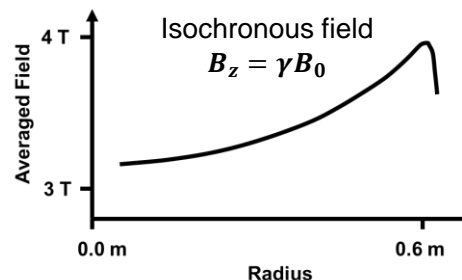
- ・ 低いDee電圧 (50/75 kV)
- ・ 少ないDeeの数 (2 dees)

・ 歳差引出 ($\nu_r = 1$ の共鳴)

$$\omega = \frac{qB_z}{\gamma m}$$

$$v_z^2 \cong -\frac{r}{B_z} \left(\frac{\partial r}{\partial B_z} \right) + F^2 (1 + 2 \tan^2 \varepsilon),$$

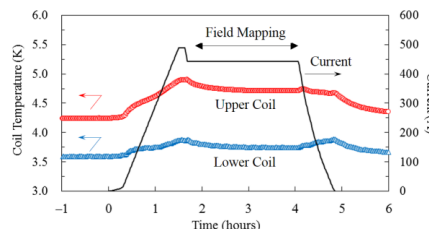
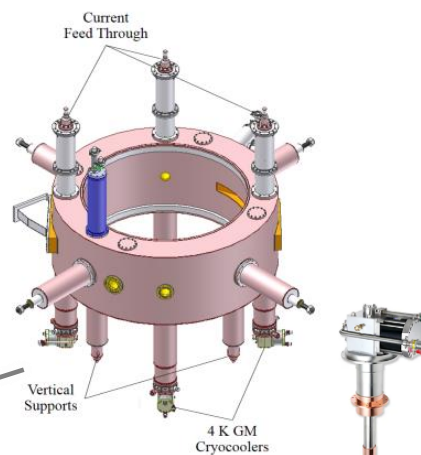
$$F^2 = \frac{(B_h - \bar{B})(\bar{B} - B_v)}{\bar{B}^2}$$



コンセプト実現を目指し、各コンポーネントが設計された。

J. Yoshida, et al. (2019).

- ・無冷媒NbTi超電導マグネット
 - ・冷凍機を用いた伝導冷却方式の採用
 - ・外部保護抵抗を用いたクエンチ保護

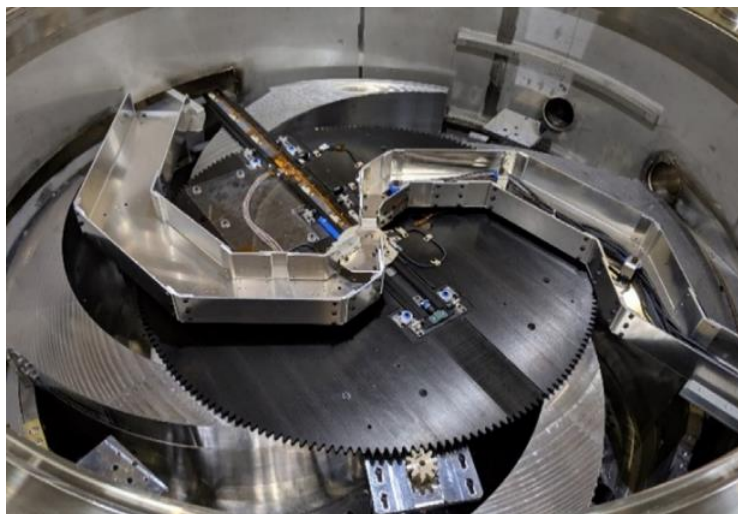


項目		仕様値
導体 	導体厚さ	2.10 mm
	導体幅	3.40 mm
	導体材料	NbTi/OFC
コイル	構成	上下1対のソレノイドコイル
	巻数	2208 Turns/Coil
冷却	方式	伝導冷却
	冷凍機	4つの4K-GM冷凍機
定格電流		約440 A
最大電流		488 A
コイル内のピーク磁場 @最大電流		4.4 T
臨界温度 @最大電流		7.4 K
コイル温度		約4.7 K (参考値)
初期冷却時間		14 days
蓄積エネルギー		5.3 MJ
クエンチ復旧時間		17 時間

安全性・保守性の高い超電導マグネットが開発された。

Y. Ebara, et al. (2020).

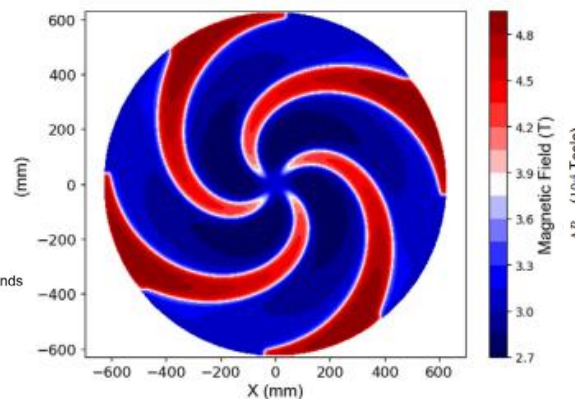
・ 磁場測定と調整



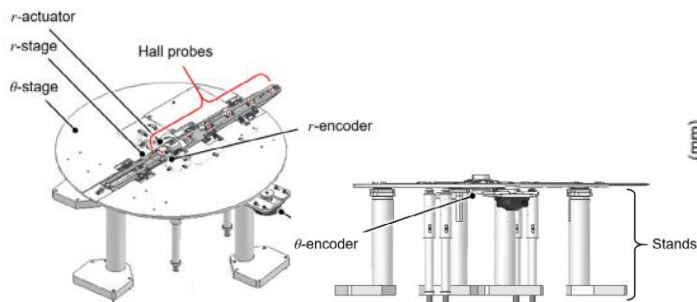
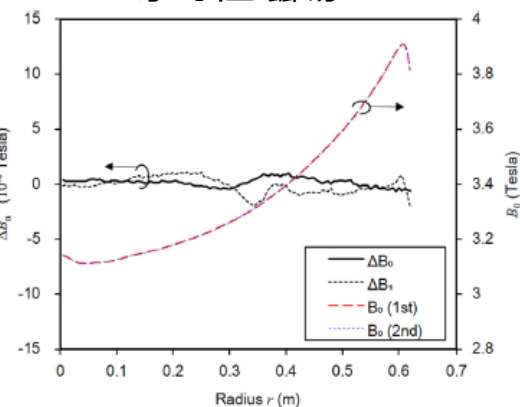
磁場測定装置

項目	仕様値
センサータイプ	ホールセンサ
センサー数	6
ステージ	リニア、回転
ステージ材質	CFRP
アクチュエータ	USMs
測定点数	~52 000
測定領域	直径1,260 mm
測定時間	2.5 時間
磁場調整方法	ヒル加工 シム調整 コイル位置調整

測定した磁場分布



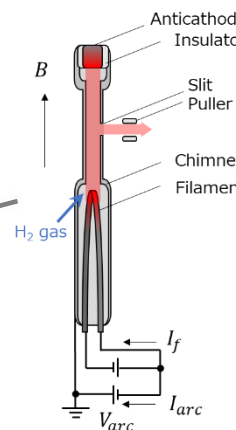
等時性磁場



磁場測定と調整によって磁場分布形成を実現

- サイクロトロン内部機器（イオン源、RFキャビティ、引出機構など）

サイクロトロン内部の様子



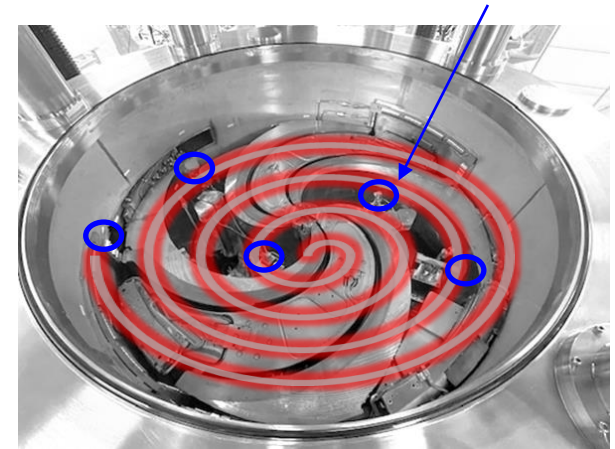
項目	仕様値
イオン源	熱カソード PIGイオン源
RFキャビティ数	2
RF周波数	95.3 MHz (h=2)
DEE電圧	50 kV (内側) 75 kV (外側)
キャビティ消費電力	<70 kW
引出機構	EHCs, ESD, MCs
引出方式	歳差引出
ESD引出電場	1×10^7 V/m
真空機構	クライオポンプ (2つ) 粗挽き用ドライポンプ (1つ)
運転可能真空度	$< 1 \times 10^{-2}$ Pa

材料制約・空間制約のなかで性能確保するよう
要素試験も含めた開発で各コンポーネントは実現された。

- ・テストサイト建設・輸送・組付けを完了（2020年）
- ・コミッショニング（2020年末～）
- ・ビームの流れに合わせてパラメータを調整

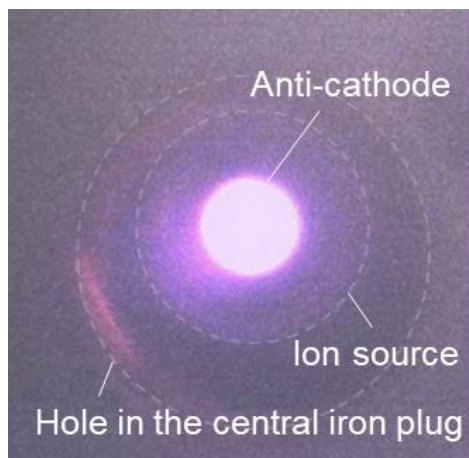
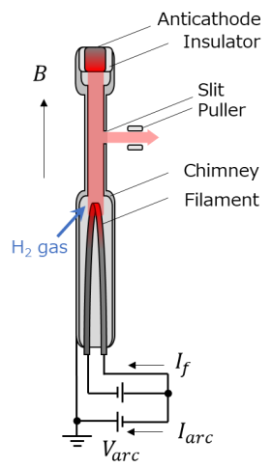


各半径に配置されたプローブ
を用いてビームの状態を確認





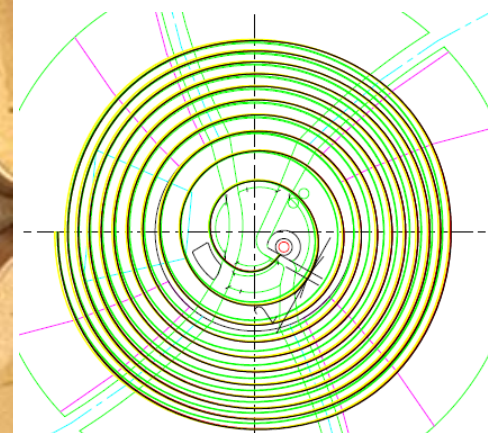
運転時のイオン源



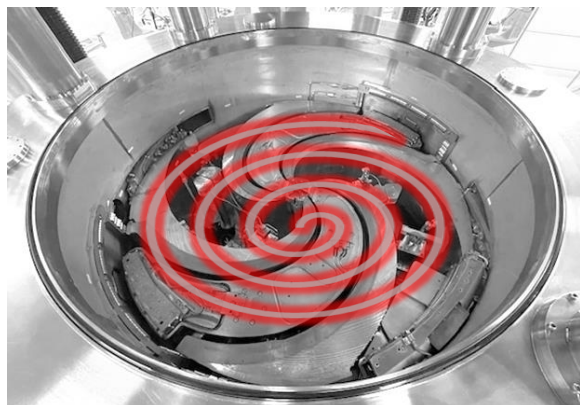
ビーム痕



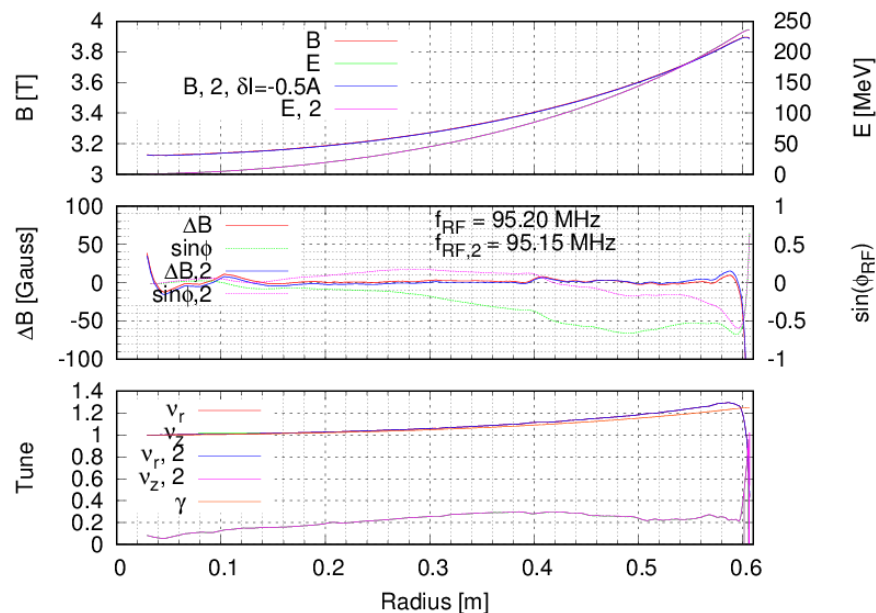
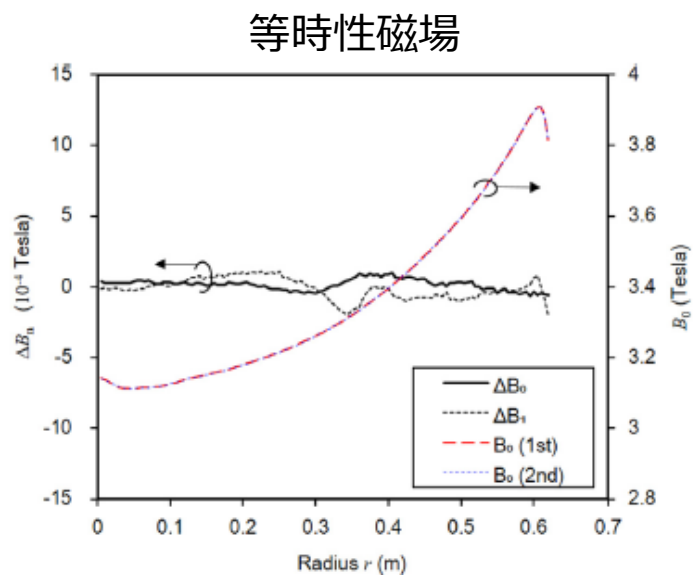
中心領域の軌道計算



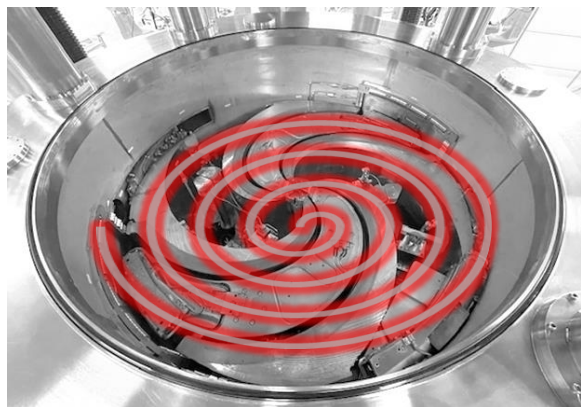
中心領域ではイオン源などのパラメータ調整



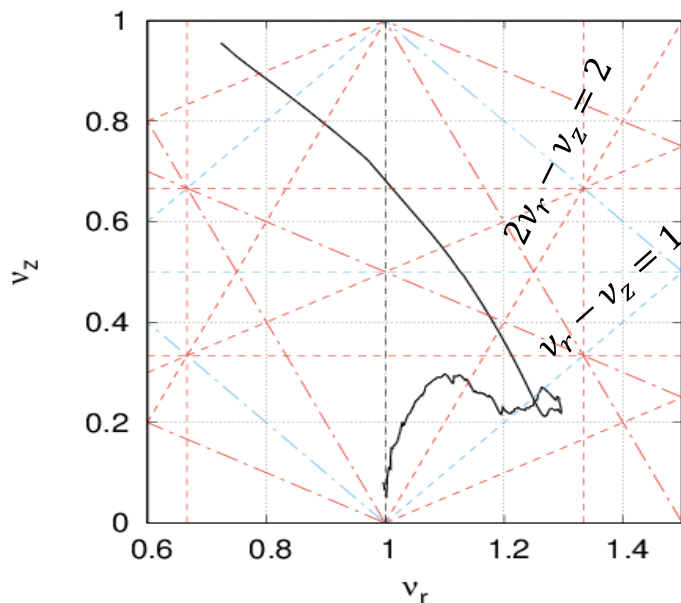
測定結果に基づいたビーム加速シミュレーション



加速領域は調整なしでビーム通過を確認

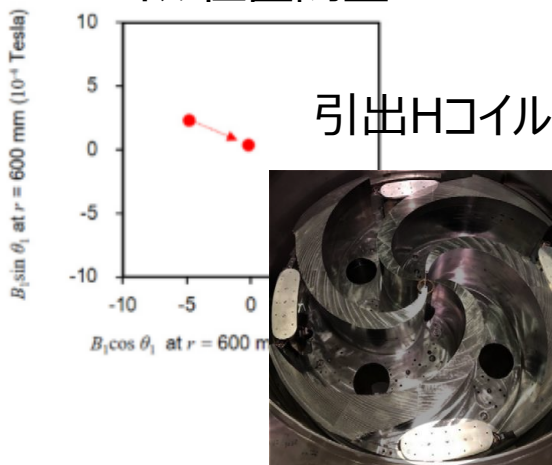


チューンダイアグラム

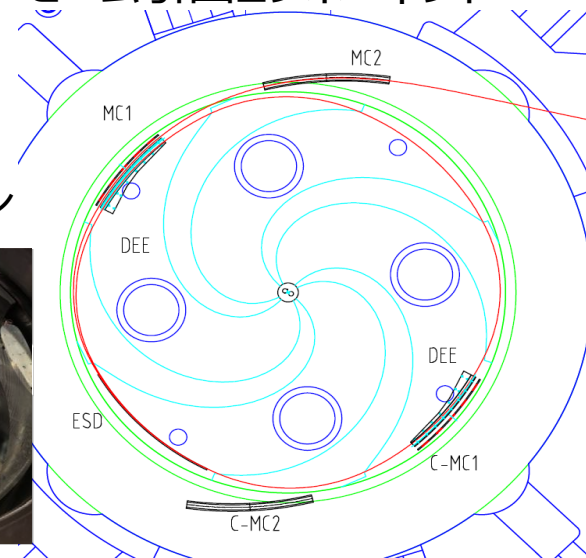


B_{z1} 調整

コイル位置調整



ビーム引出コンポーネント



歳差引出により高い引出効率を実現

- ・ ビーム引出しに成功（2021年7月）

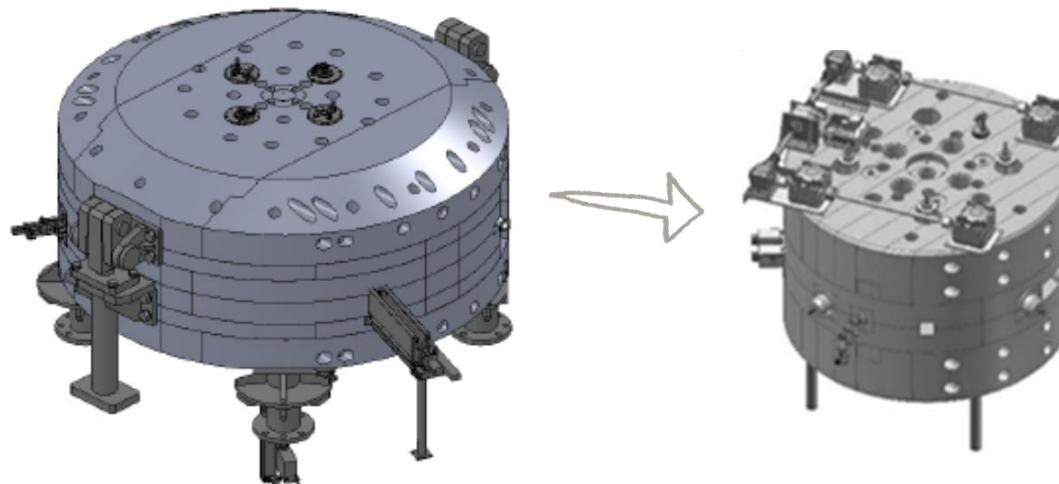


- 各要求仕様を満たすパラメータセットを探索

項目	要求	Pass/Fail
引出効率	$\geq 60 \%$	✓ Pass
最大ビーム電流	$\geq 1,000 \text{ nA}$	✓ Pass
最小ビーム電流	$< 1 \text{ nA}$	✓ Pass
ビーム電流安定度 (2分間、3ms積分時間)	$\leq 1 \%$ (1σ)	✓ Pass
ビーム電流安定度 (1秒間、3ms積分時間)	$\leq 2 \%$ (1σ)	✓ Pass
ビーム応答性	$\leq 50 \mu\text{sec}$	✓ Pass
加速エネルギー	233-238 MeV	✓ Pass
ビームエネルギー再現性	$< 0.2 \text{ MeV}$	✓ Pass
ビーム位置安定性 (2分間)	$< 0.1 \text{ mm for 2minutes}$	✓ Pass
RMSミツタンズ	$< 2.2 \text{ pi mm mrad (X)}$ $< 1.4 \text{ pi mm mrad (Y)}$	✓ Pass
消費電力	$< 250 \text{ kW}$	✓ Pass

各要求を満たすビーム性能を得ることができた。

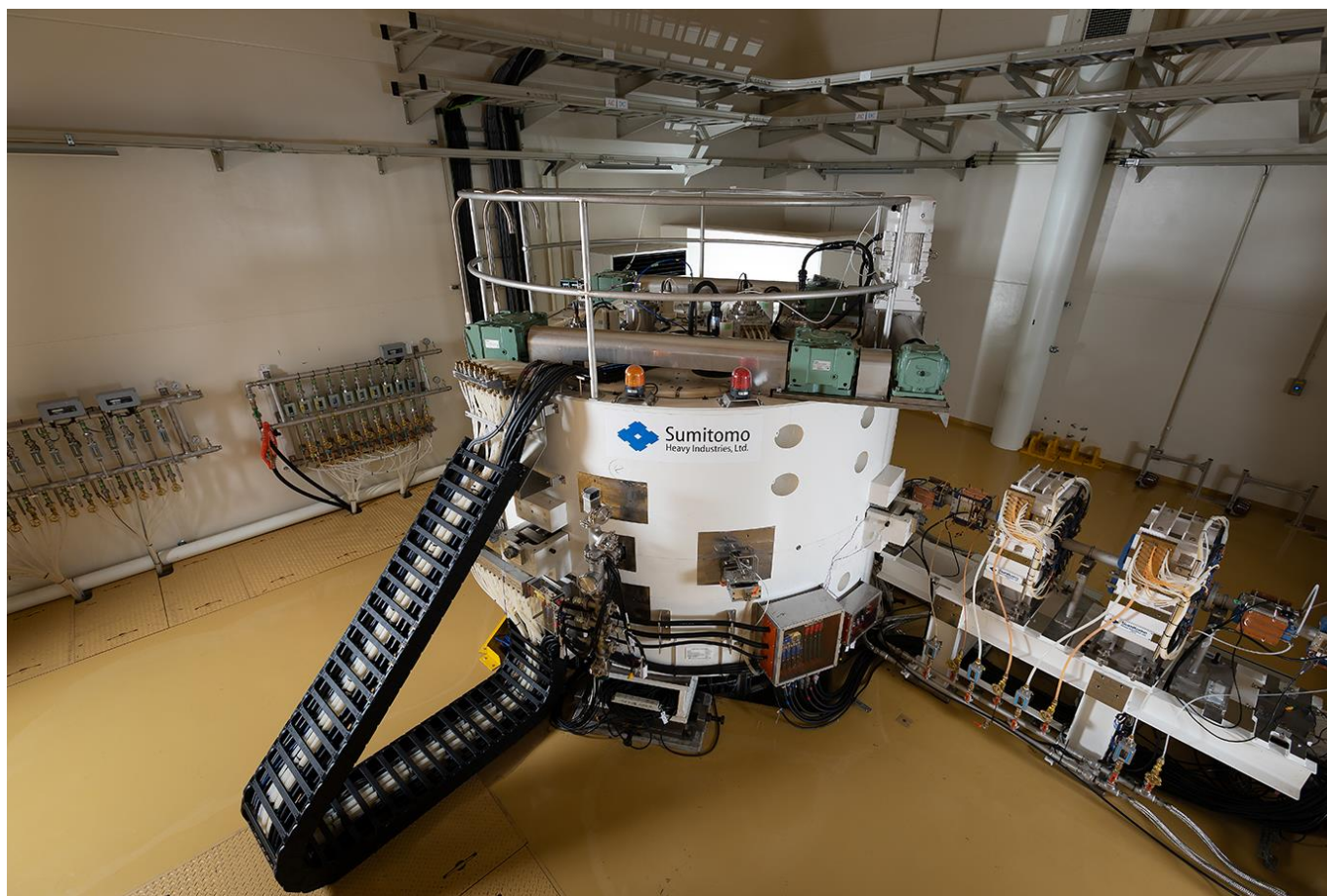
➤ コミッショニングを完了（2021年11月）



項目	従来機	目標値	Pass/Fail
重量	220 t	65 t	✓ Pass
消費電力	330 kW	<200 kW	✓ Pass
ビーム電流	300 nA	>1000 nA	✓ Pass

「小型×省エネ×大電流」の超電導サイクロトロンを実現

➤ コミッショニングを完了（2021年11月）



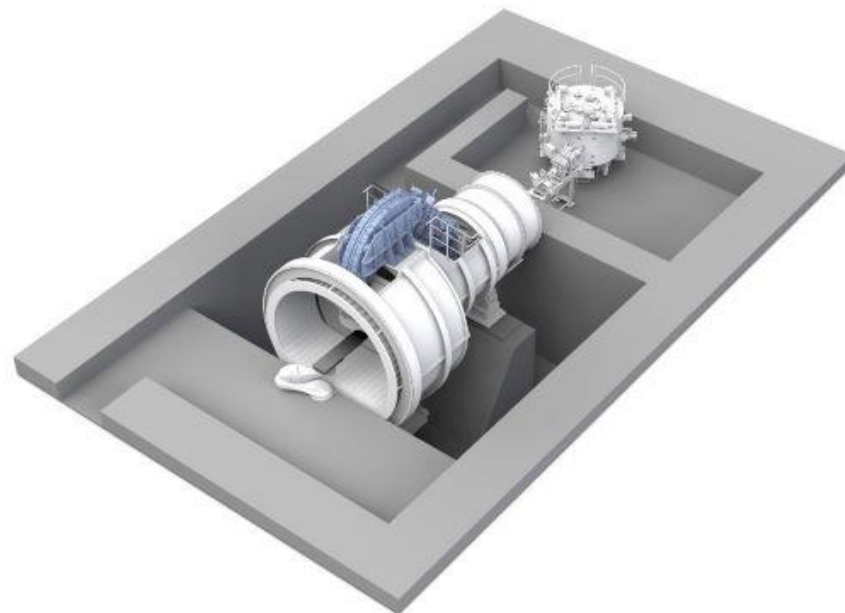
「小型×省エネ×大電流」の超電導サイクロトロンを実現

- 陽子線治療向け超電導AVFサイクロトロンを開発
- コミッショニングを完了

「小型・省エネ・大電流」



超電導サイクロトロンを採用した
次世代陽子線治療装置



今後、陽子線治療への貢献が期待されている。

ご清聴ありがとうございました

