

QST 重粒子線治療用加速器の超伝導化

量子科学技術研究開発機構 (QST)

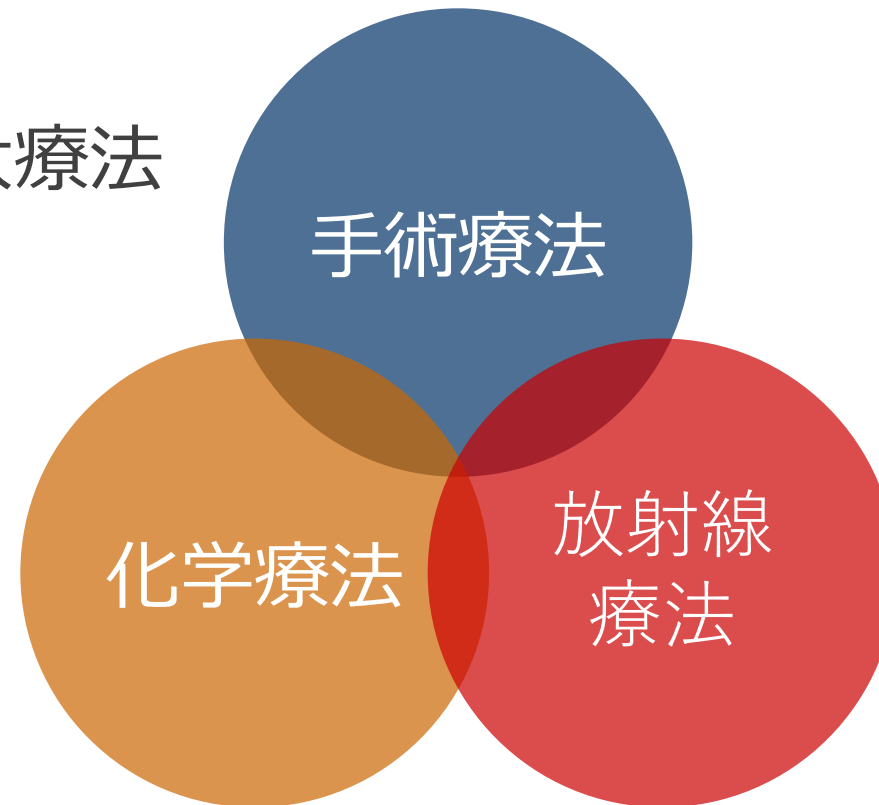
水島 康太

- 1. はじめに**
- 2. 重粒子線治療の課題**
- 3. 超伝導回転ガントリーの開発**
- 4. 次世代治療装置プロジェクト**
- 5. 今後の計画**

1. はじめに

「**重粒子線治療**」とは… 放射線による **がん治療法** のひとつ

がんの三大療法



- 光子線 (X線、 γ 線)
- 粒子線
 - 陽子線 (p)
 - **重粒子線 ($\geq\text{He}$)**
 - 中性子線
- ...

1. はじめに

放射線治療の歴史

1895年: レントゲンがX線を発見

1896年: 乳がん(米)、鼻咽頭がん(独)などにX線が照射され始める

以降、世界で放射線の医療応用が積極的に試みられていく

(出典 http://www.jira-net.or.jp/vm/chronology_radiantrays.html)



Wilhelm Conrad Röntgen
(1845-1923)



放射線治療のメリット

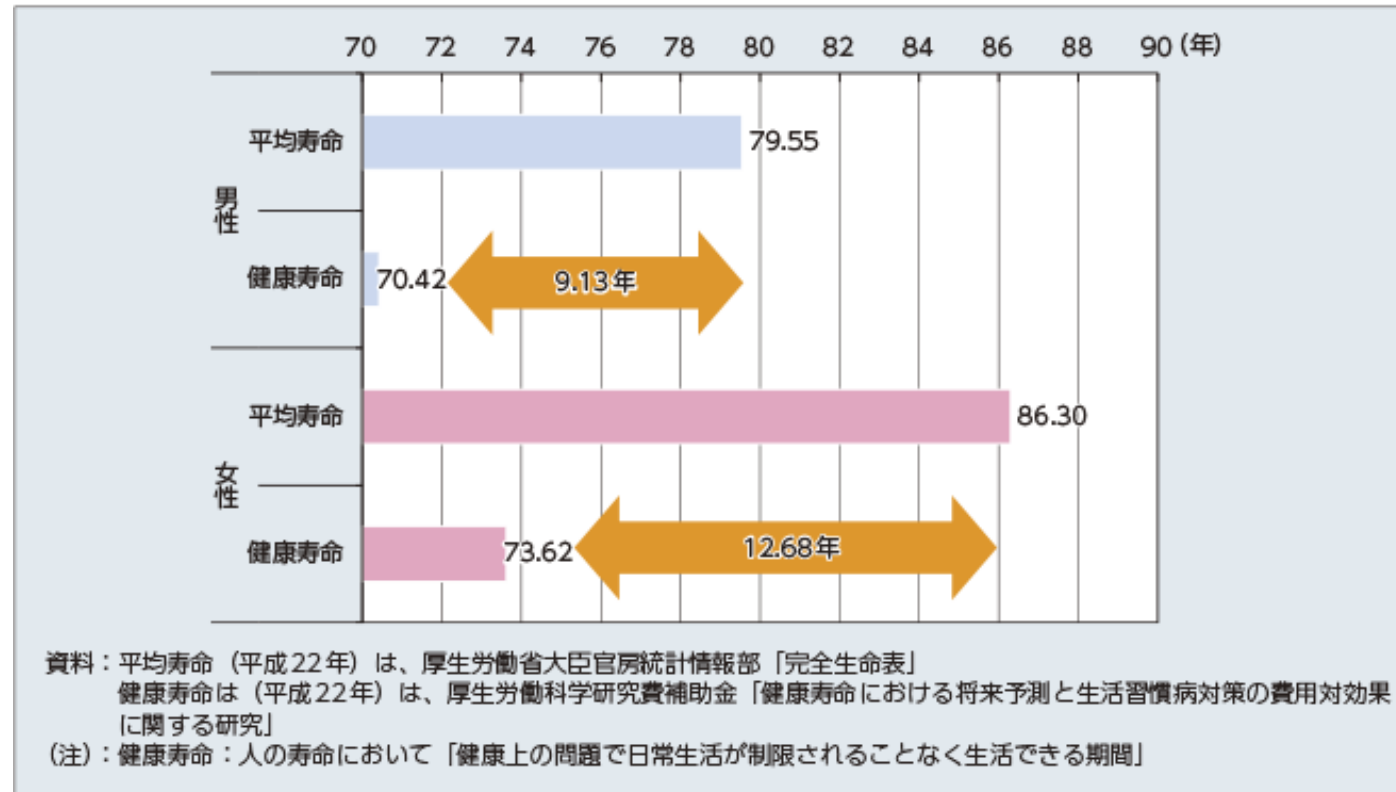
- ① 手術に比べて身体的負担が少ない
- ② 通院での治療も可能
- ③ 臓器の機能・形態を温存できる

➔ 治療後も“生活の質”(QOL)を維持しやすい

1. はじめに

高齢化社会では医療費増加が問題となる

➔ 平均寿命だけでなく「健康寿命」を伸ばすことが重要

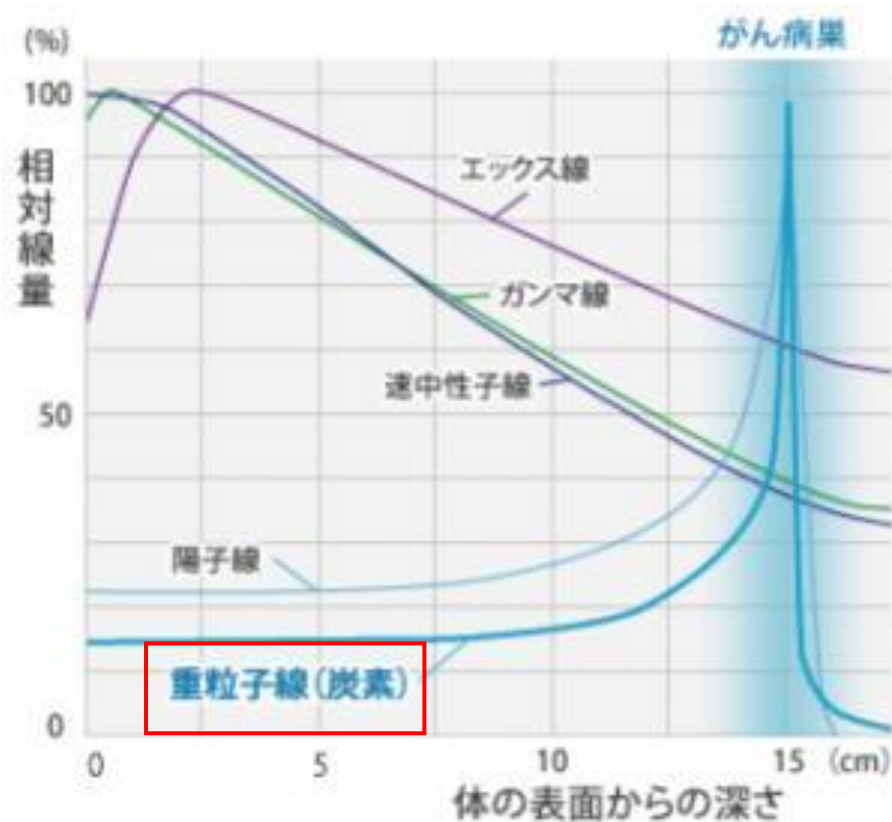


(H26年度厚生労働白書 <https://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/kousei/14/backdata/1-3-1-04.html>)

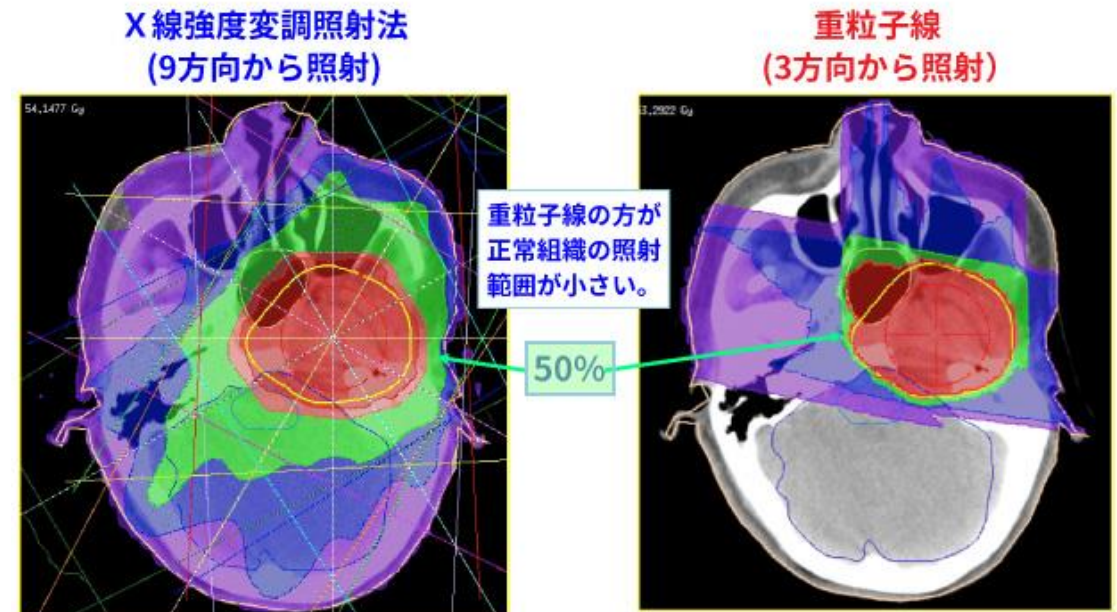
1. はじめに

放射線治療のテーマ

「いかに病巣だけに集中して照射できるか」



X線と重粒子線の線量分布の比較(頭蓋底腫瘍)



線量分布 赤: 96%, 緑: 50%, 青: 30%, 紫: 10%

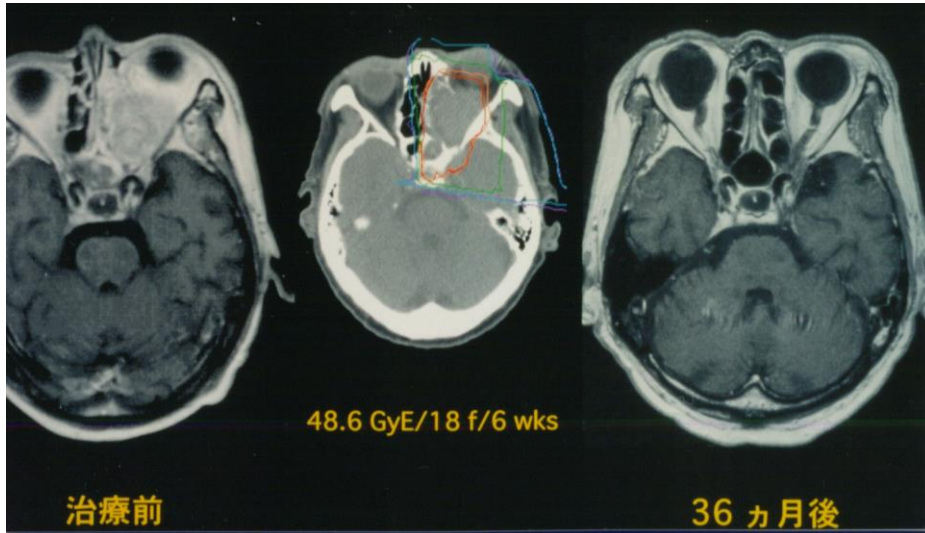
(QST病院HP <https://www.nirs.qst.go.jp/hospital/radiotherapy/carbonion.php>)

1. はじめに

重粒子線治療のメリット

- 線量集中性が高い（正常組織の損傷少ない）
- 線量当たりの生物効果も高い（細胞致死に効果的）
- 短期治療が可能（1回~12回、16回分割） ⇔ X線、陽子線：24~40回分割
- 手術困難がん（※限局腫瘍）や放射線抵抗性がんにも有効

治療例（頭頸部がん）



治療例（仙骨脊索腫）

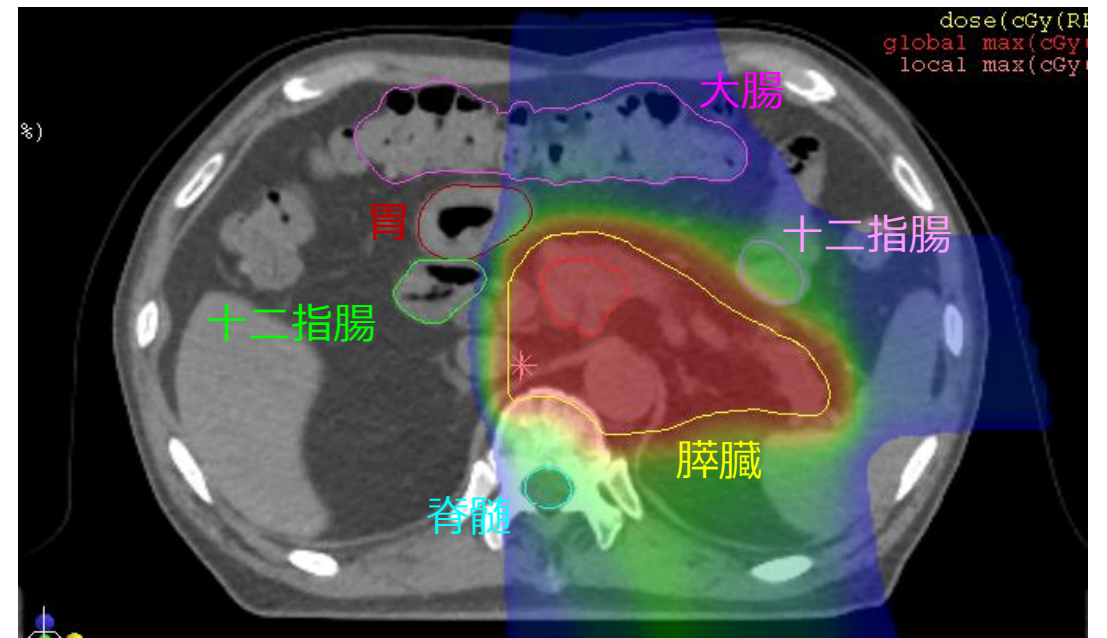


1. はじめに

膵臓がんにも有効？

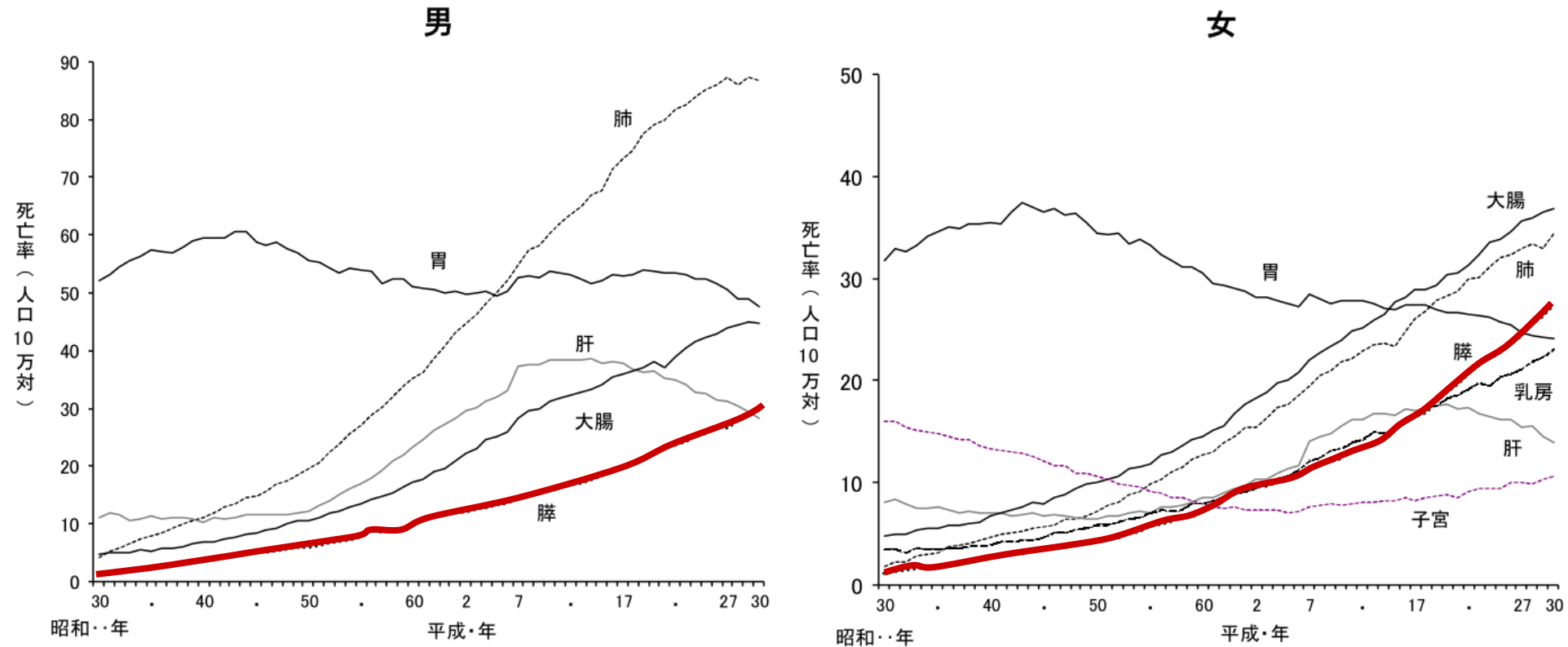
膵臓がんの特徴

- 主要ながんで最も生存率が低い（5年生存率:5~10%）
- 切除可能なら外科手術が第一選択
 - ⇒ 初期の自覚症状がほとんどない
 - ⇒ 発見した段階で切除可能な症例はわずか20%程度
- 重要臓器に囲まれており 線量増加が困難
- 腫瘍中心部が放射線抵抗性（低酸素状態）



1. はじめに

図8 悪性新生物<腫瘍>の主な部位別にみた死亡率（人口10万対）の年次推移



(厚生労働省 人口動態統計 <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/kakutei18/index.html>)

1. はじめに

切除不能膵がんの放射線化学療法

報告者	報告年	数	治療方法	線量	生存率	
					1年	2年
ECOG	2008	34	GEM+RT	50.4Gy	50%	12%
		37	GEM	-	32%	4%
Ishii	2010	50	GEM	-	64%	14%
Sudo	2011	34	S-1+RT	50.4Gy	71%	25%
Small	2011	28	GEM+BZ**+RT	36Gy/15fr.	45%	17%
Schellenberg	2011	20	GEM+SBRT	25Gy/1fr.	50%	20%
NIRS	2013	47	GEM+CIRT	45.6-55.2 GyE	74%	54%

*Bevacizumab(抗血管新生阻害剤)

5FU:抗がん剤

GEM:ゲムシタビン (抗がん剤)

RT:X線

CIRT:重粒子線

S. Yamada, Vita vol.32 no.1 (2015) (URL: <http://ryushisen.com/pdf/msr4-yamada.pdf>)

1. はじめに
2. **重粒子線治療の課題**
3. **超伝導回転ガントリーの開発**
4. **次世代治療装置プロジェクト**
5. **今後の計画**

2. 重粒子線治療の課題

重粒子線治療が抱える課題

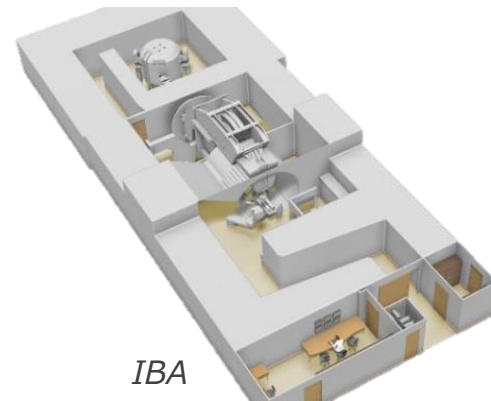
巨大な装置と専用建屋 ⇒ 導入費・維持費の高額化 ⇒ 普及の遅れ

X線治療装置



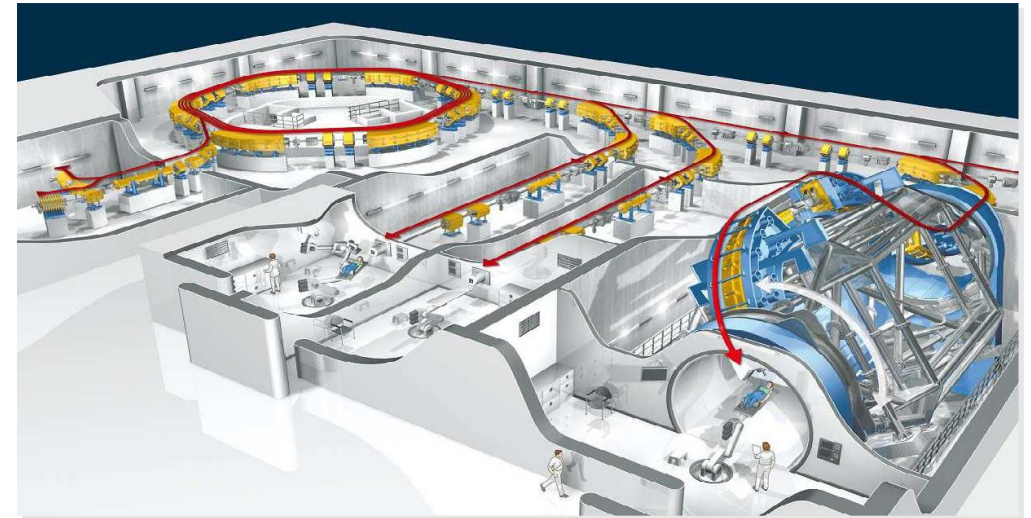
Varian

陽子線治療装置



IBA

重粒子線治療装置



Heidelberg Ion Beam Therapy Center (HIT)

2. 重粒子線治療の課題

陽子線治療はおおむね普及化に成功

一方、重粒子線は…？

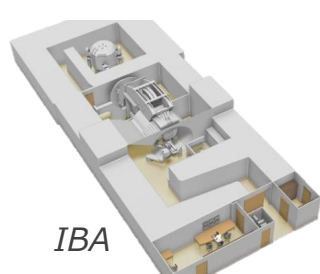
陽子線

施設数： > +10 施設/年
導入費： ~50 億円？
ビームエネルギー： ~230 MeV
(Bp: ~2.3 Tm)

⇔

重粒子

~ +1 施設/年
>100 億円
~430 MeV/u (12C)
(Bp: ~6.6 Tm)



IBA

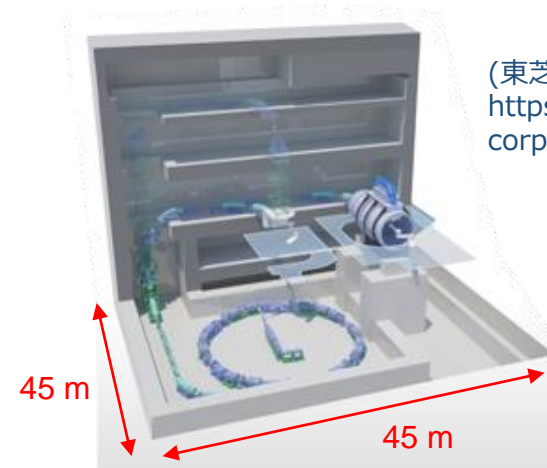


Varian



Hitachi

加速器の小型化
+ 最小パッケージ化
(~ 20 x 10 m²)



(東芝ニュースリリース
<https://www.global.toshiba/jp/news/corporate/2015/11/pr1001.html>)

2. 重粒子線治療の課題

国内の重粒子線治療施設



(産業原子力新聞 <https://www.jaif.or.jp/journal/feature/heavyiontherapy/2527.html>)

2. 重粒子線治療の課題

世界の重粒子線治療施設

(2019年7月更新)



(QST病院 HP <https://www.nirs.qst.go.jp/rd/collaboration/himac/overseas.html>)

2. 重粒子線治療の課題

重粒子線治療にかかる費用（※表記は技術料のみ、診療費・入院費等は含まず）

保険適用疾患の場合（※患者負担は表記費用の0～3割分）

- 前立腺がん（160万円）
- 頭頸部・骨軟部・脾臓・眼・大腸、肝臓・婦人科の一部（237.5万円）

先進医療（保険適用外）の場合

- 300～350万円

高額な治療費の一因 ⇒ **治療施設の高額な導入費用**
⇒ 保険適用拡大の障害

➡ 多くの人に高度な治療を提供するためには
小型で安価な治療装置の開発が必須

2. 重粒子線治療の課題

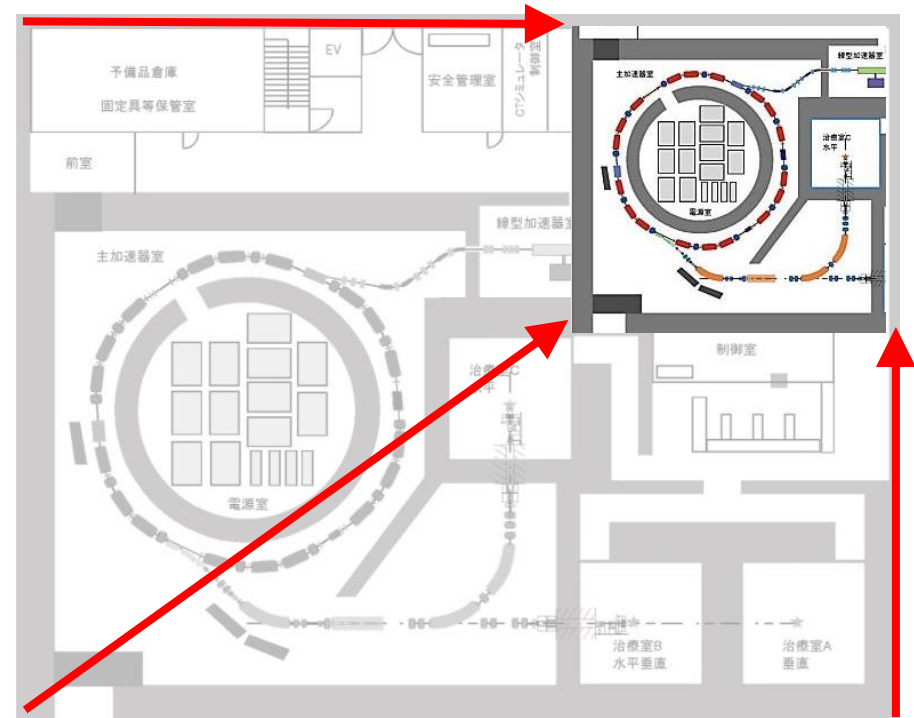
多くの人に高度な治療を提供するためには
小型で安価な治療装置の開発が必須

課題解決方針

装置の小型化 ⇒ 超伝導技術の利用

低コスト化 ⇒ 建屋の縮小
最小パッケージ化（設計固定）

➡ 重粒子線治療の普及化



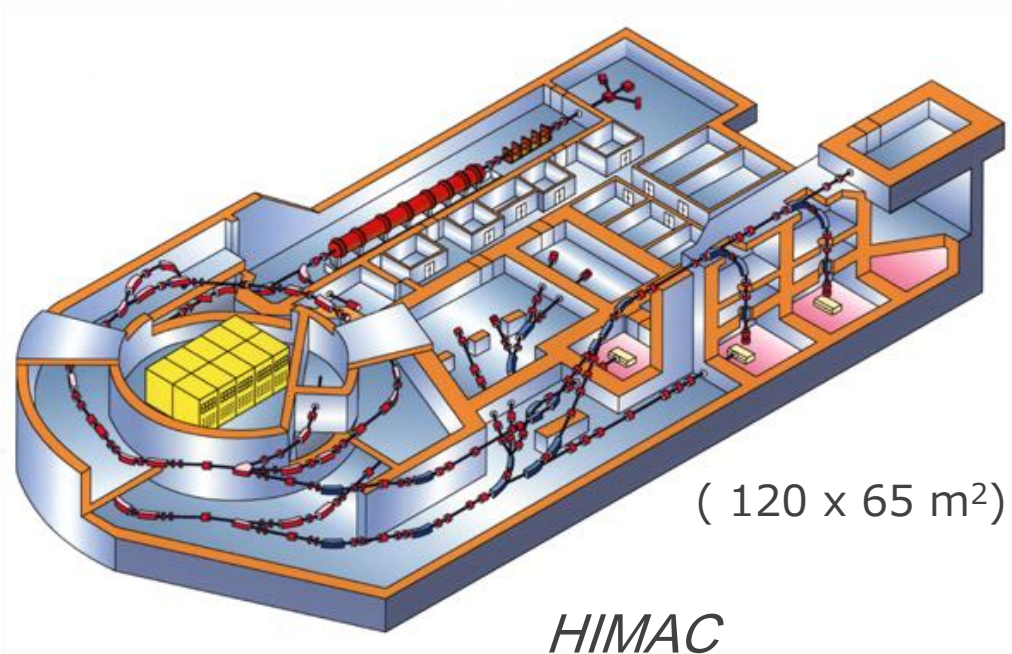
1. はじめに
2. 重粒子線治療の課題
3. 超伝導回転ガントリーの開発
4. 次世代治療装置プロジェクト
5. 今後の計画

3. 超伝導回転ガントリーの開発

重粒子線治療施設の変遷

放射線医学総合研究所 (NIRS)

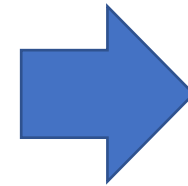
1994年に炭素線治療を開始
治療患者数は延べ12,000人以上
建設費: 330億円



(120 x 65 m²)

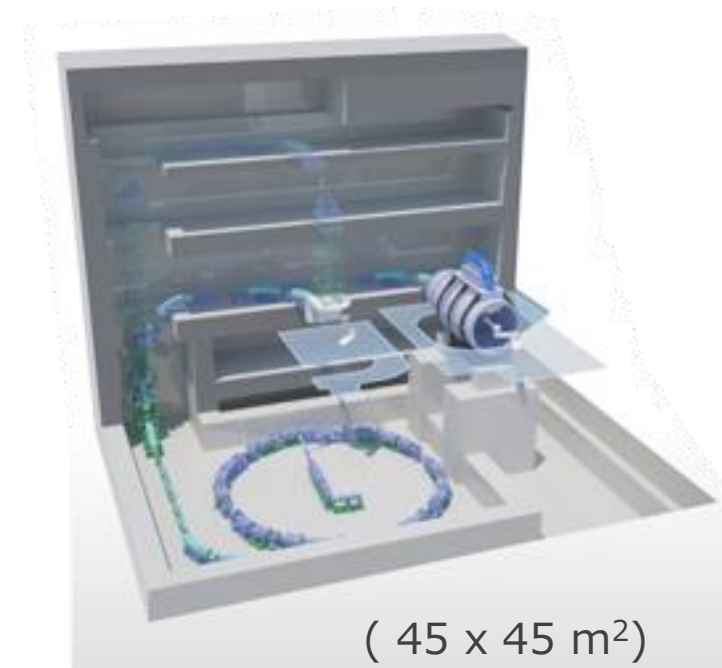
HIMAC

(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)



東日本重粒子センター (山形大学)

2021年に炭素線治療を開始
超伝導回転ガントリーを採用



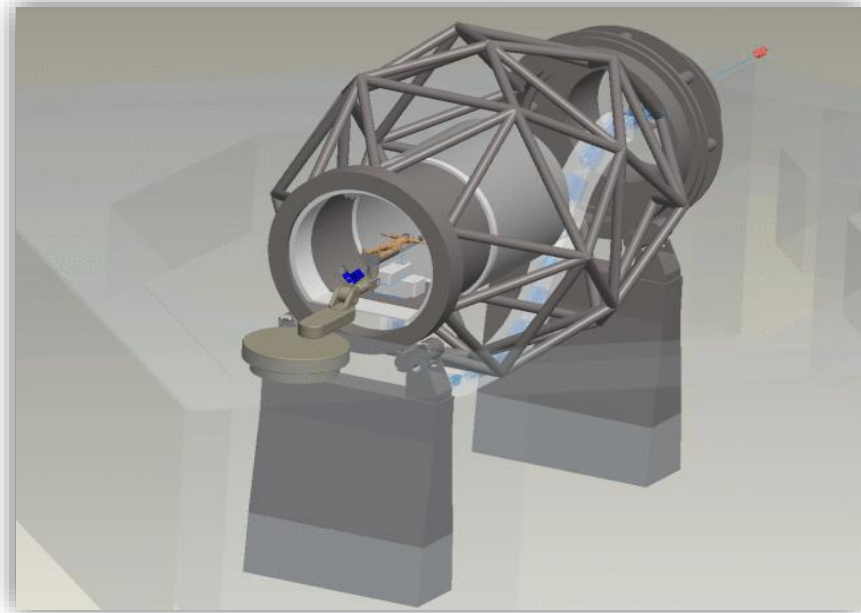
(45 x 45 m²)

(東芝ニュースリリース
<https://www.global.toshiba/jp/news/corporate/2015/11/pr1001.html>)

3. 超伝導回転ガントリーの開発

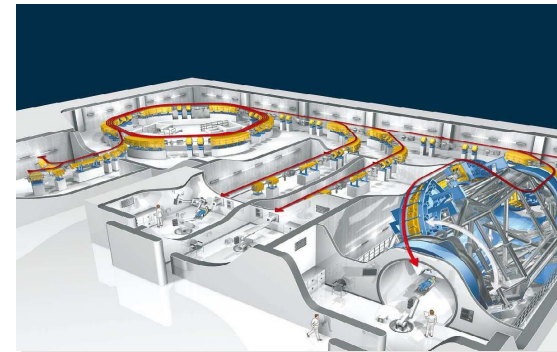
回転ガントリー照射装置

- 0-360度の任意方向から粒子線を照射するための装置
- 線量分布最適化と治療時間短縮に有用

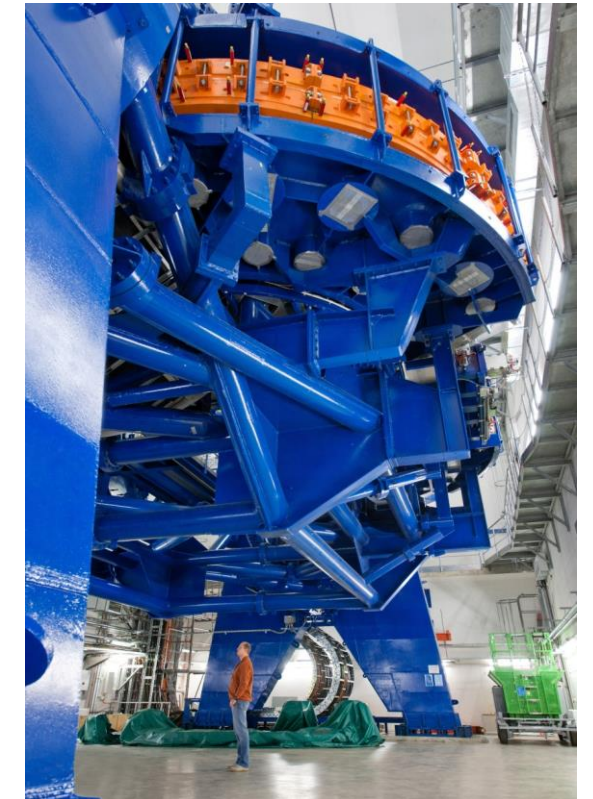


(従来装置)
全長: 25m
重量: >600t

Heidelberg Ion Beam Therapy Center (HIT)



(2012年運用開始)

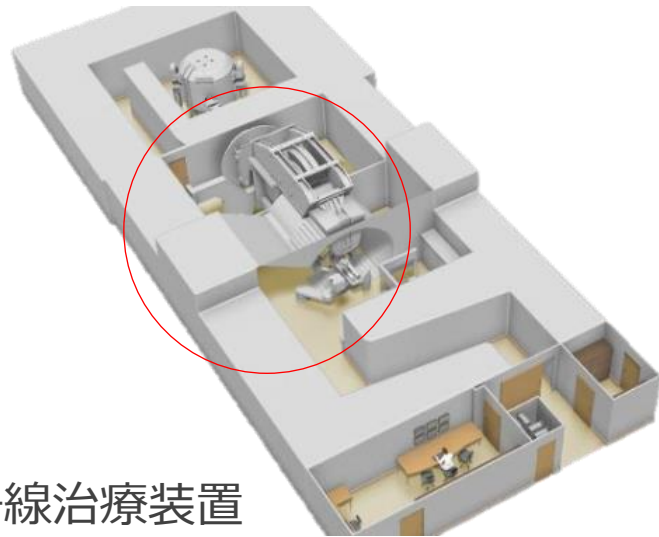


R. Fuchs et al., in Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, 2008, pp. 1839–1841.

3. 超伝導回転ガントリーの開発

回転ガントリー照射装置

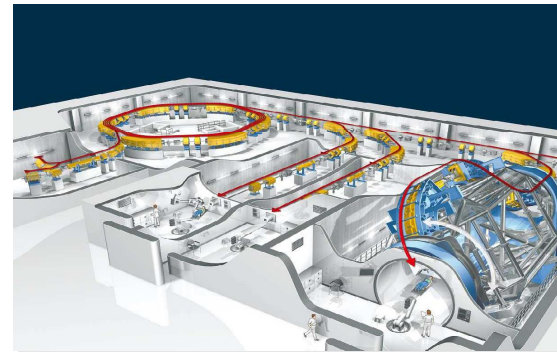
陽子線治療では標準的に搭載されるが
重粒子線治療では装置が巨大すぎて
まったく普及していなかった



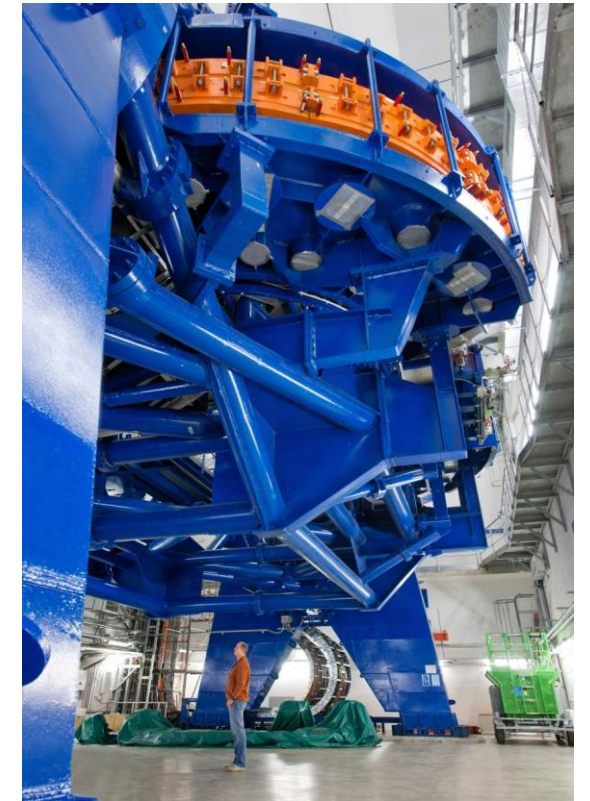
陽子線治療装置

(従来装置)
全長: 25m
重量: >600t

Heidelberg Ion Beam Therapy Center
(HIT)



(2012年運用開始)



R. Fuchs et al., in Proc. of EPAC08, Genoa, Italy, 2008, pp. 1839–1841.

3. 超伝導回転ガントリーの開発

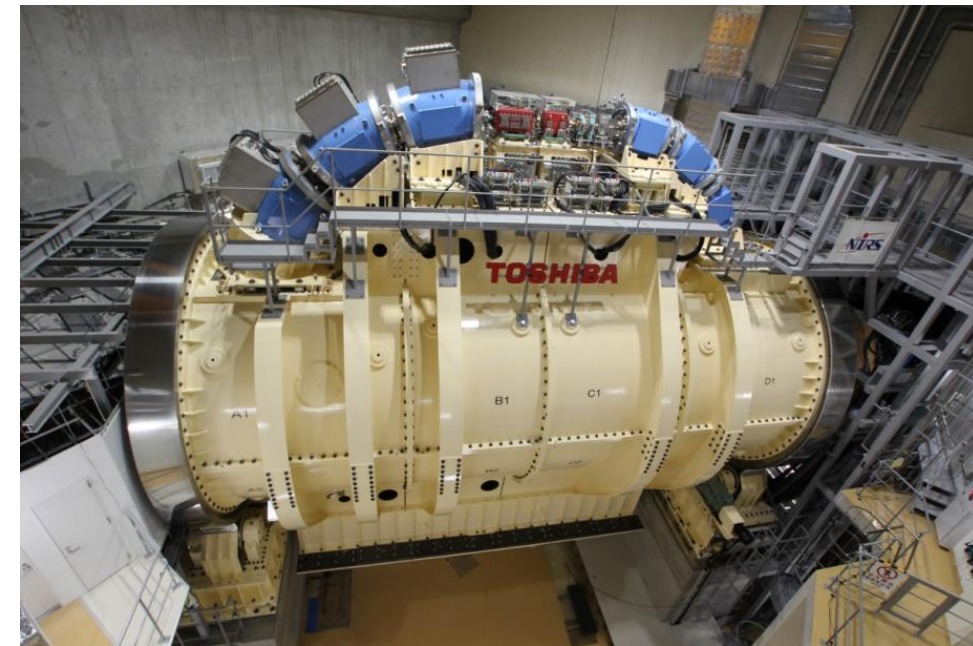
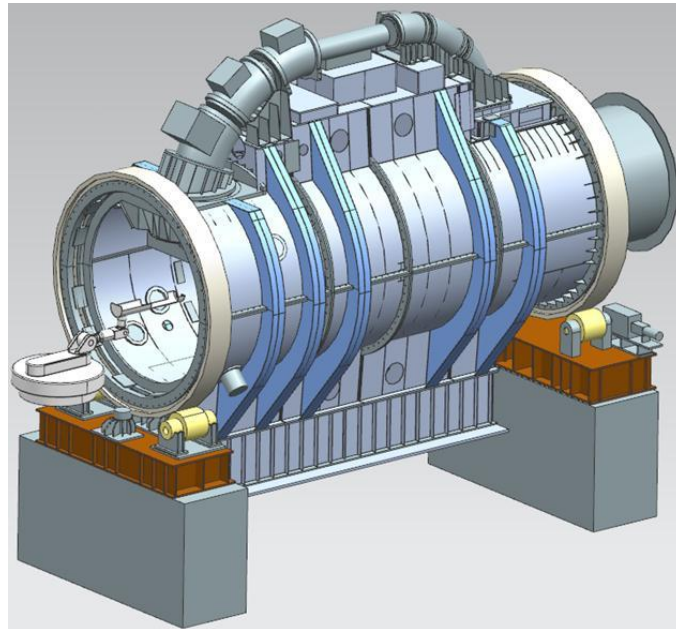
回転ガントリーの超伝導化

(従来装置)
全長: 25m
重量: >600t



(超伝導)
全長: 14m
重量: ~300t

放医研と東芝で共同開発された
従来装置（常伝導）の半分の大きさと重量
2017年に治療運用開始



超伝導回転ガントリー装置／NIRS

Y. Iwata et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 405 (2017) 338–342.

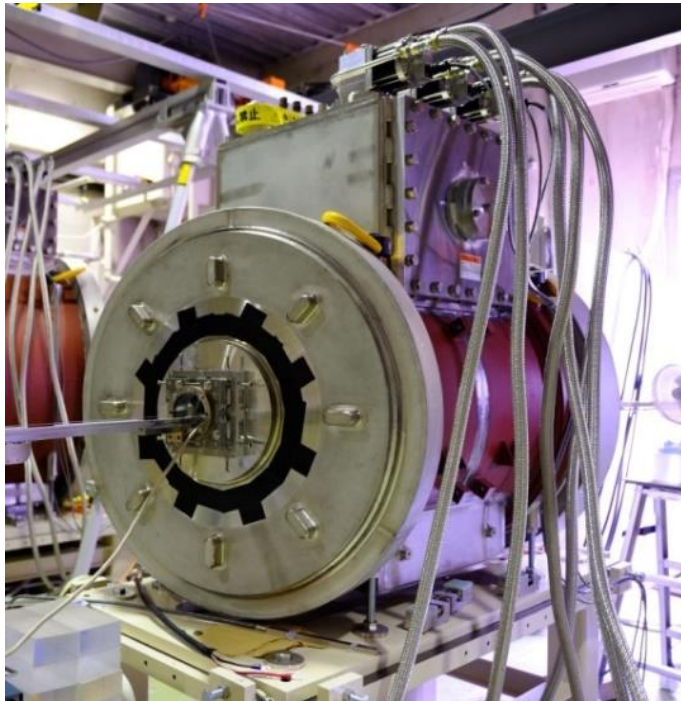
3. 超伝導回転ガントリーの開発

回転ガントリーの超伝導化

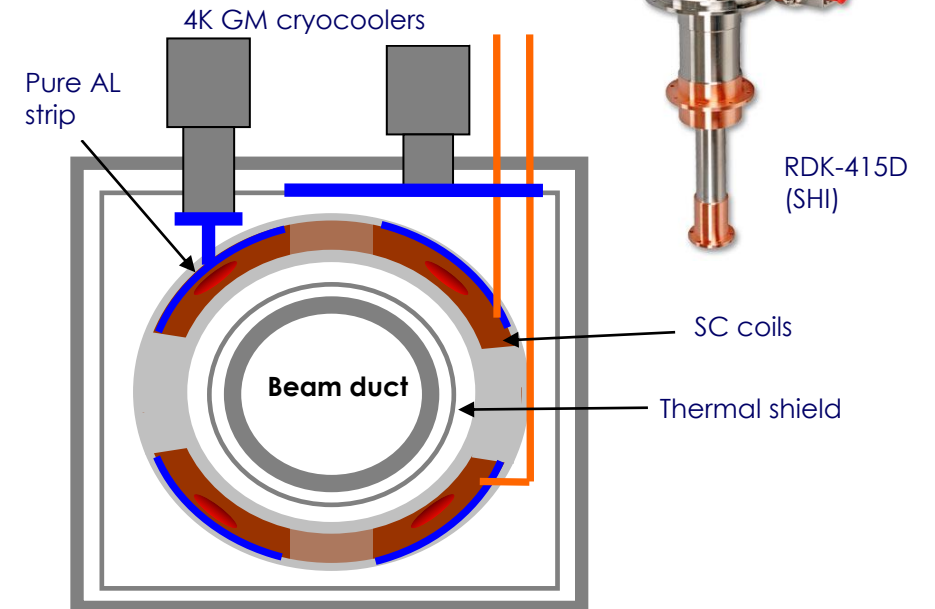
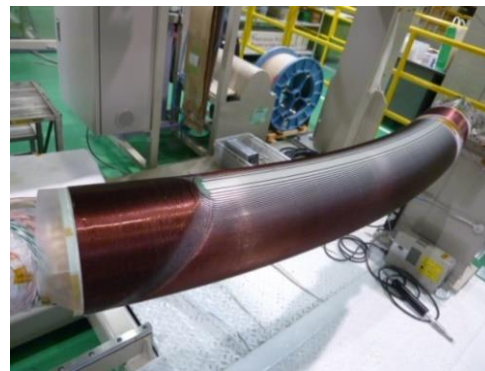
特徴

- 重粒子線のエネルギー変更にあわせた交流運転
- 二極 (~2.9T)・四極磁場の機能結合型
- 高純度アルミ伝熱パスを用いた伝導冷却
- 液体ヘリウム不使用 (回転動作も可能)

回転ガントリー用電磁石



超伝導コイル (NbTi)



3. 超伝導回転ガントリーの開発

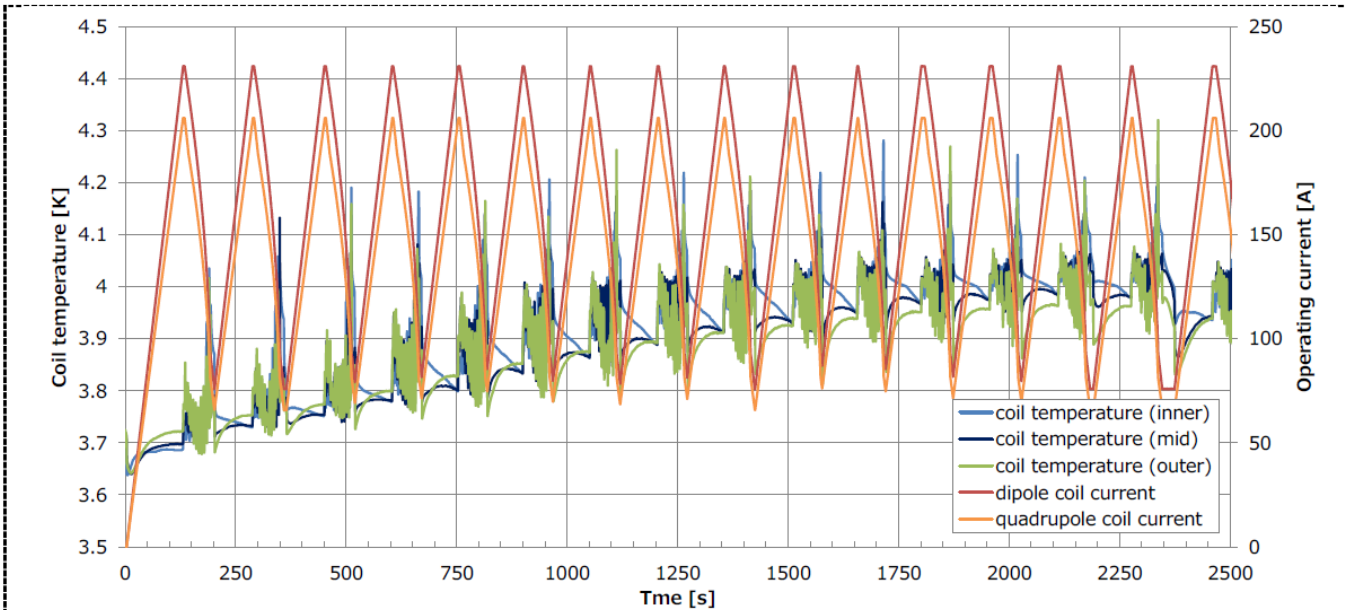


Figure 3. Test results of operating pattern in which coil was excited from 430 MeV/u to 80 MeV/u in 200 steps (BM10).

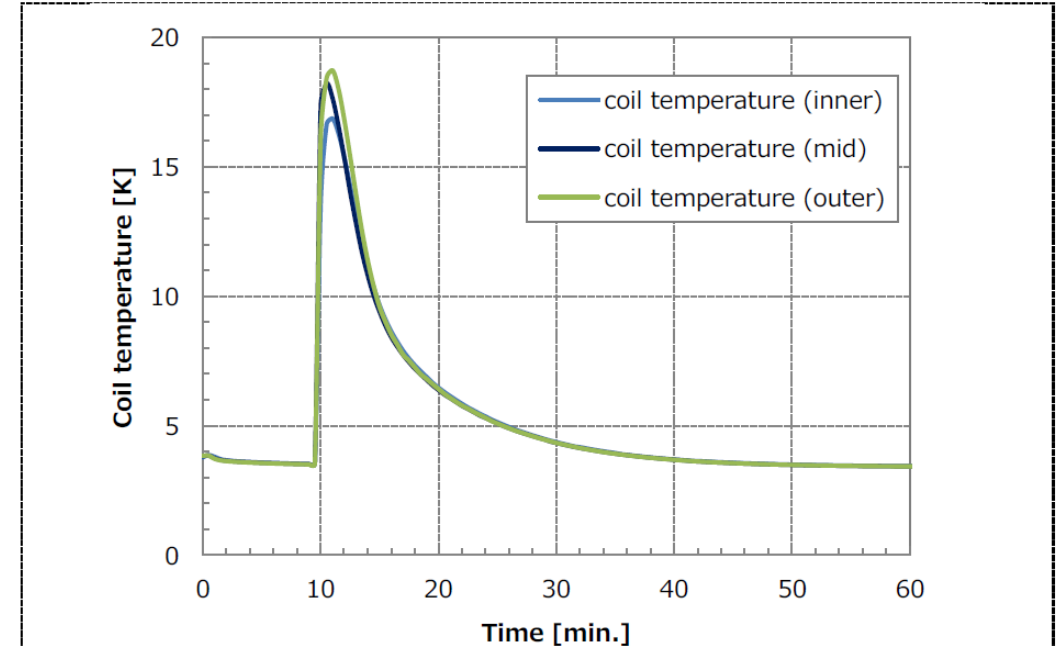


Figure 4. The re-cooling curve after quenching was occurred (BM6).

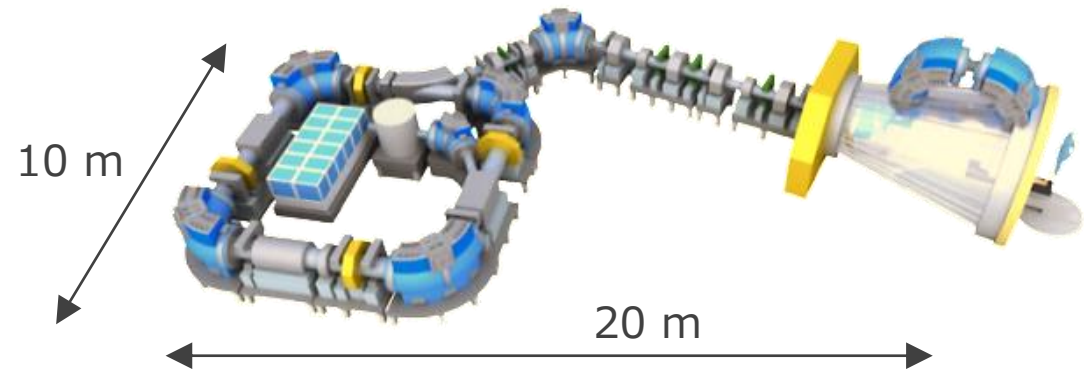
S Takayama et al, J. Phys.: Conf. Ser. 871 (2017) 012083.

1. はじめに
2. 重粒子線治療の課題
3. 超伝導回転ガントリーの開発
4. 次世代治療装置プロジェクト
5. 今後の計画

4. 次世代治療装置プロジェクト

次世代重粒子線治療装置 “量子メス”の開発プロジェクト

- シンクロトロン偏向電磁石も超伝導化
- 入射器にはレーザーイオン加速器を採用予定
- 既存の病院建屋にも設置を検討



Y. Iwata et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 28(3) (2018) 4400807.

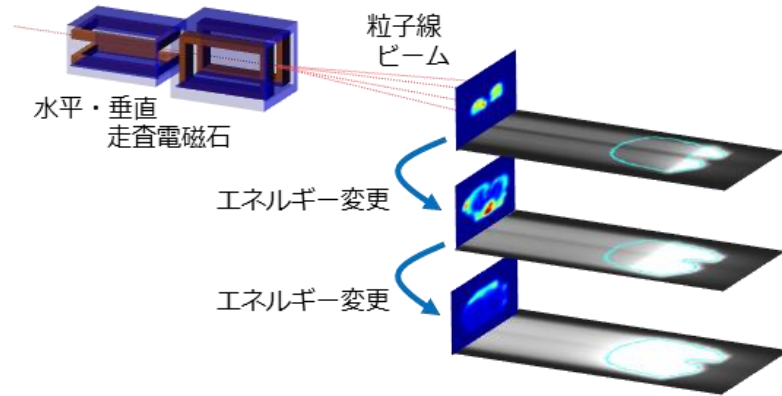
次世代装置に求められること

- 小型・低コストな装置
- 高い安定性・治療スループット

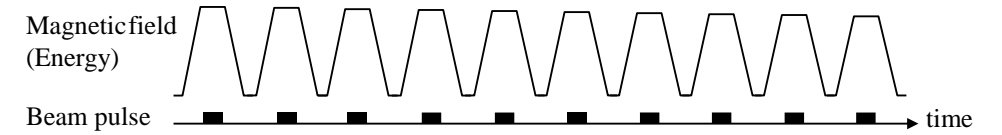
➔ 治療室 1 部屋でも
年間 700人 の治療を目指す
(20年以内の返済が可能)

4. 次世代治療装置プロジェクト

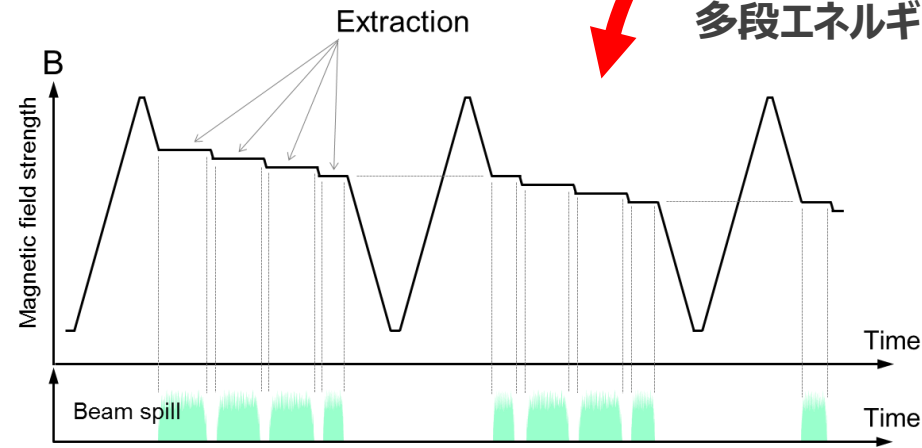
重粒子線照射のためのシンクロトン運転



従来の運転方法



多段エネルギー運転



- エネルギー変更の高速化
- ビーム入射回数の最小化

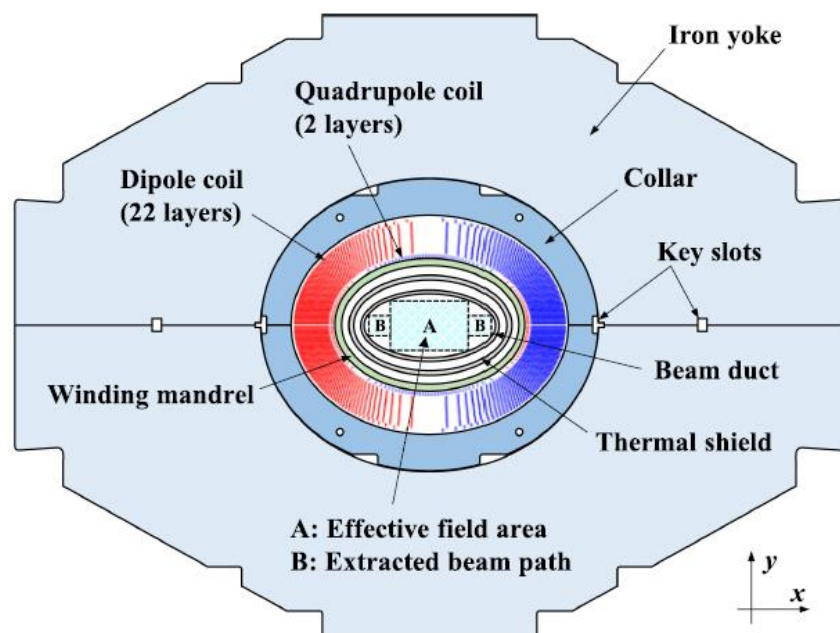


- 励磁速度仕様の緩和

K. Mizushima et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res B 406 (2017) 347-351.

4. 次世代治療装置プロジェクト

重粒子シンクロトロンSC磁石



- LHeレスの伝導冷却で検討
- 回転ガントリーよりも細いフィラメント採用
- アルミ伝熱パスも細分化

TABLE I
SPECIFICATIONS OF THE SUPERCONDUCTING MAGNET

Central field	0.3–3.5 T
Central field gradient	0.1–1.5 T/m
Ramp rate	0.64 T/s
Operation temperature	4.2 K
Bending angle	45 degrees
Magnetic length	1.49 m
Curvature radius	1.89 m
Reference radius	30 mm
Field quality	2.5×10^{-4} (injection)
	3.5×10^{-4} (top energy)
Field gradient quality	1.0×10^{-3}

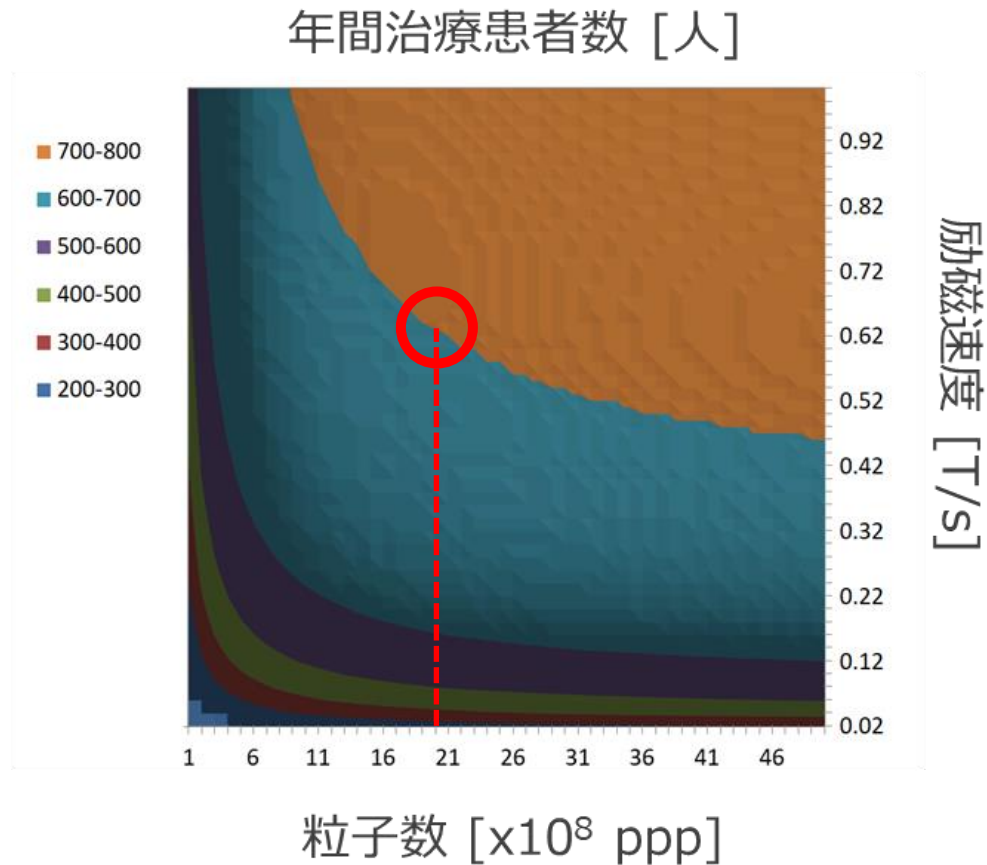
TABLE II
COIL PARAMETERS OF THE SUPERCONDUCTING MAGNET

Item	Dipole	Quadrupole
No. of turns/pole	1070	36
No. of winding layers	22	2
Inner radius	<i>a</i> : 77 mm <i>b</i> : 55 mm	<i>a</i> : 72 mm <i>b</i> : 50 mm
Outer radius	<i>a</i> : 103 mm <i>b</i> : 81 mm	<i>a</i> : 74 mm <i>b</i> : 52 mm
Nominal current	265 A (3.5 T)	123 A (1.5 T/m)
Stored energy	193 kJ	0.06 kJ
Self-inductance	5.51 H (low field) 5.46 H (nominal field)	8.39 mH

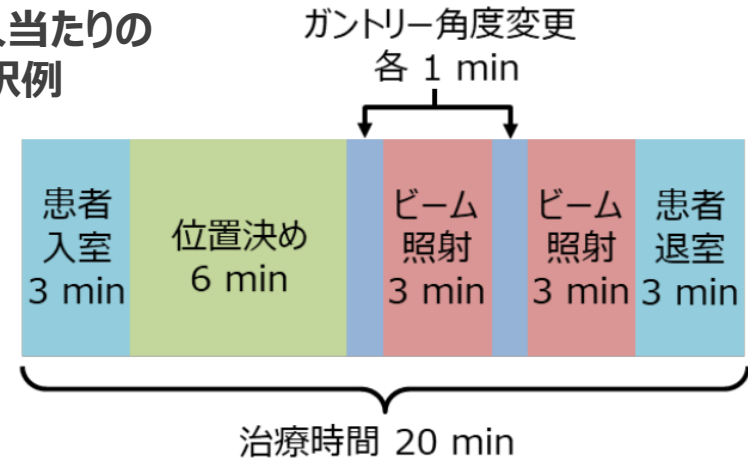
K. Mizushima et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 32(6) (2022) 4401405.

4. 次世代治療装置プロジェクト

磁場掃引速度仕様



治療1人当たりの
時間内訳例



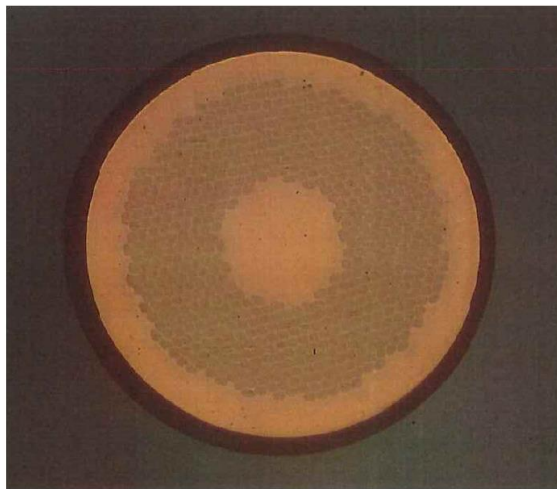
励磁速度をパラメータとして年間治療人数を計算
(年240日 \times 8時間、平均照射分割8回)

年間700人のボーダーラインから
励磁速度仕様を 0.64 T/s と決めた

4. 次世代治療装置プロジェクト

低交流損失NbTiモノリス線材

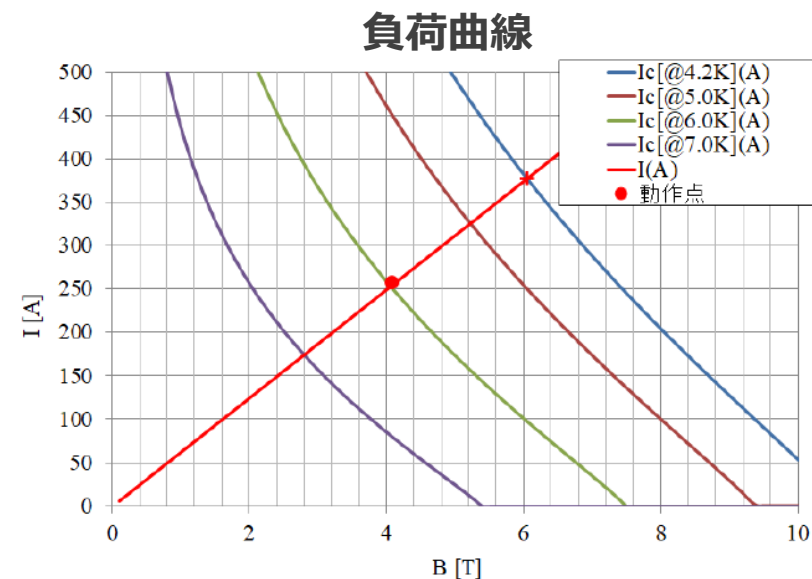
線材断面
拡大図



- ヒステリシス損失低減のために細いフィラメント
- 古河電気工業にて試作実績あり

TABLE III
CHARACTERISTICS OF THE SUPERCONDUCTING WIRE

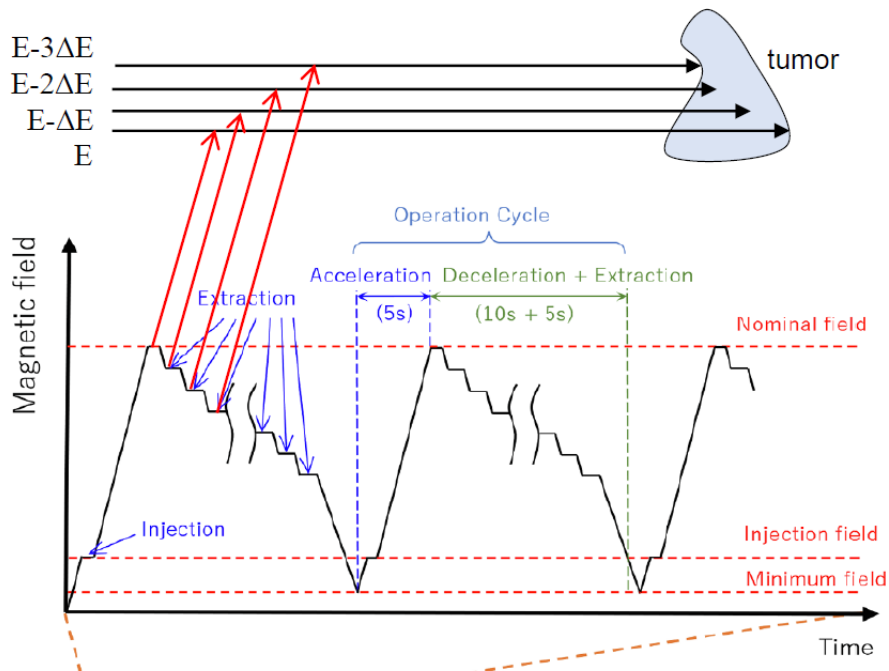
Diameter	ϕ 1.0 mm (without insulation) ϕ 1.1 mm (with insulation)
Cu:CuNi:NbTi	1.43:1.40:1.00
Filament diameter	2.4 μ m
Number of filaments	33600
Twist pitch	10 mm
Critical current	492 A (5 T, 4.2 K) 399 A (6 T, 4.2 K) 305 A (7 T, 4.2 K)
RRR	166 (0 T), 82 (2 T), 63 (3 T)



<負荷曲線(線成績値: $I_c = 492.0$ (A) @5.00(T)/4.20(K))>
動作点: $I_{op} = 264.9$ (A), $B_{op} = 4.30$ (T), $T_{op} = 4.20$ (K)
動作点での臨界温度: $T_{cs} = 5.82$ (K)
温度マージン: $\Delta T (= T_{cs} - T_{op}) = 1.62$ (K)
負荷率: $I_{op}/I_c(4.2K) = 70.8\%$ [@ $I_c = 374.4$ (A), $B_c = 6.08$ (T)]

4. 次世代治療装置プロジェクト

発熱量の見積もり



Y. Yang et al., Cryogenics 126 (2022) 103524.

仮定サイクル

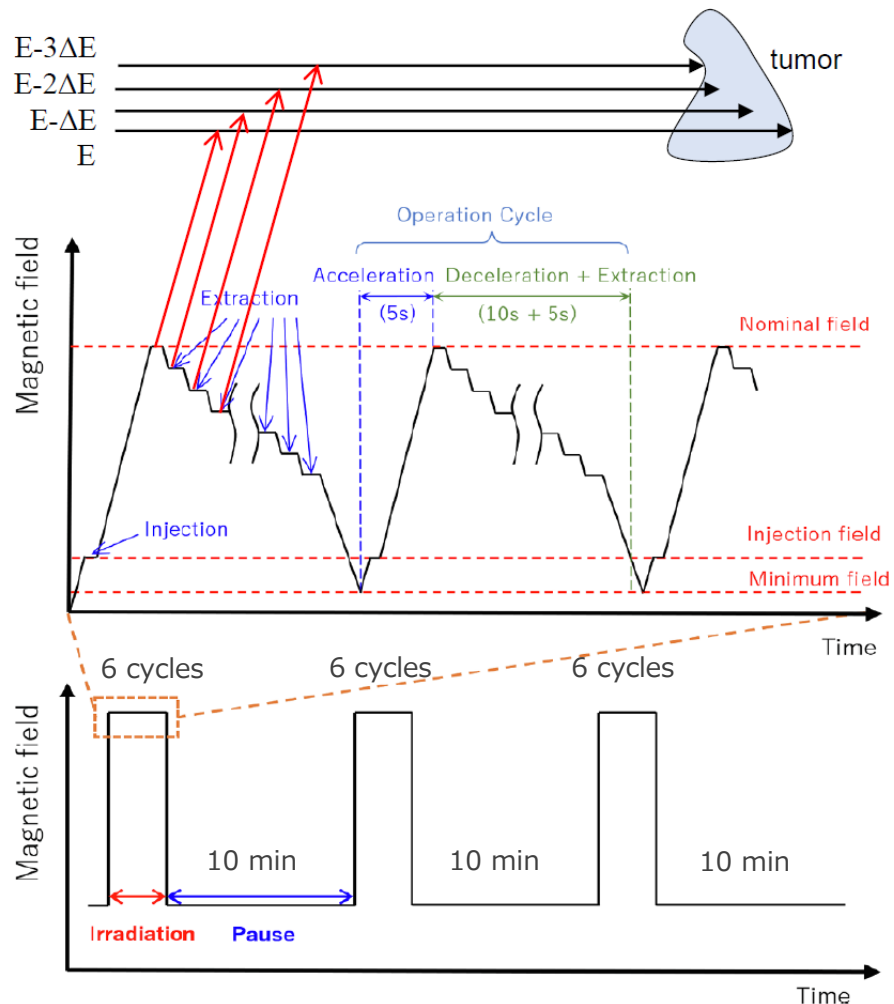
- 5秒加速 → 計10秒ホールド → 5秒減速

Item	Volume [$\times 2 \text{ m}^3$]	Cycle 2 (0.2 T \rightarrow 3.5 T \rightarrow 0.2 T)		Stage	Material	
		Loss [J/cycle]	Power [W/cycle]			
Dipole coil	(Hysteresis)	6.49×10^{-3}	140.25	7.01	2nd	Sc wire
		(Coupling)	10.38			
Quadrupole coil	4.25×10^{-4}	(Hysteresis)	11.75	0.59	2nd	Sc wire
		(Coupling)	1.40	0.07		
Iron yoke	2.68×10^{-1}	(Hysteresis)	16.08	0.80	2nd	Silicon steel
		Collar	2.28×10^{-2}	3.76		
Thermal path	4.47×10^{-4}	(Quadrupole)	20.91	1.05	2nd	Aluminum
		(Dipole)	4.47×10^{-4}	7.18		
Thermal shield	(Inner layer)	1.33×10^{-3}	30.63	1.53	1st	SUS304
Total			211.71	10.59	2nd	
			30.63	1.53	1st	

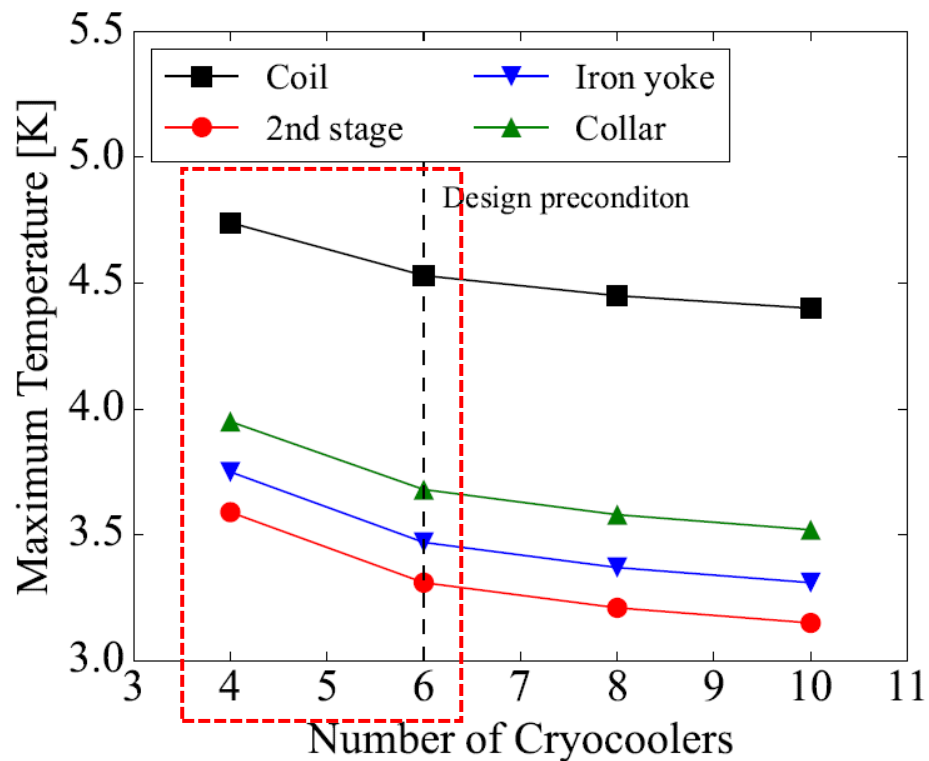
- 二極コイルのヒステリシス損失が支配的

4. 次世代治療装置プロジェクト

運転温度シミュレーション

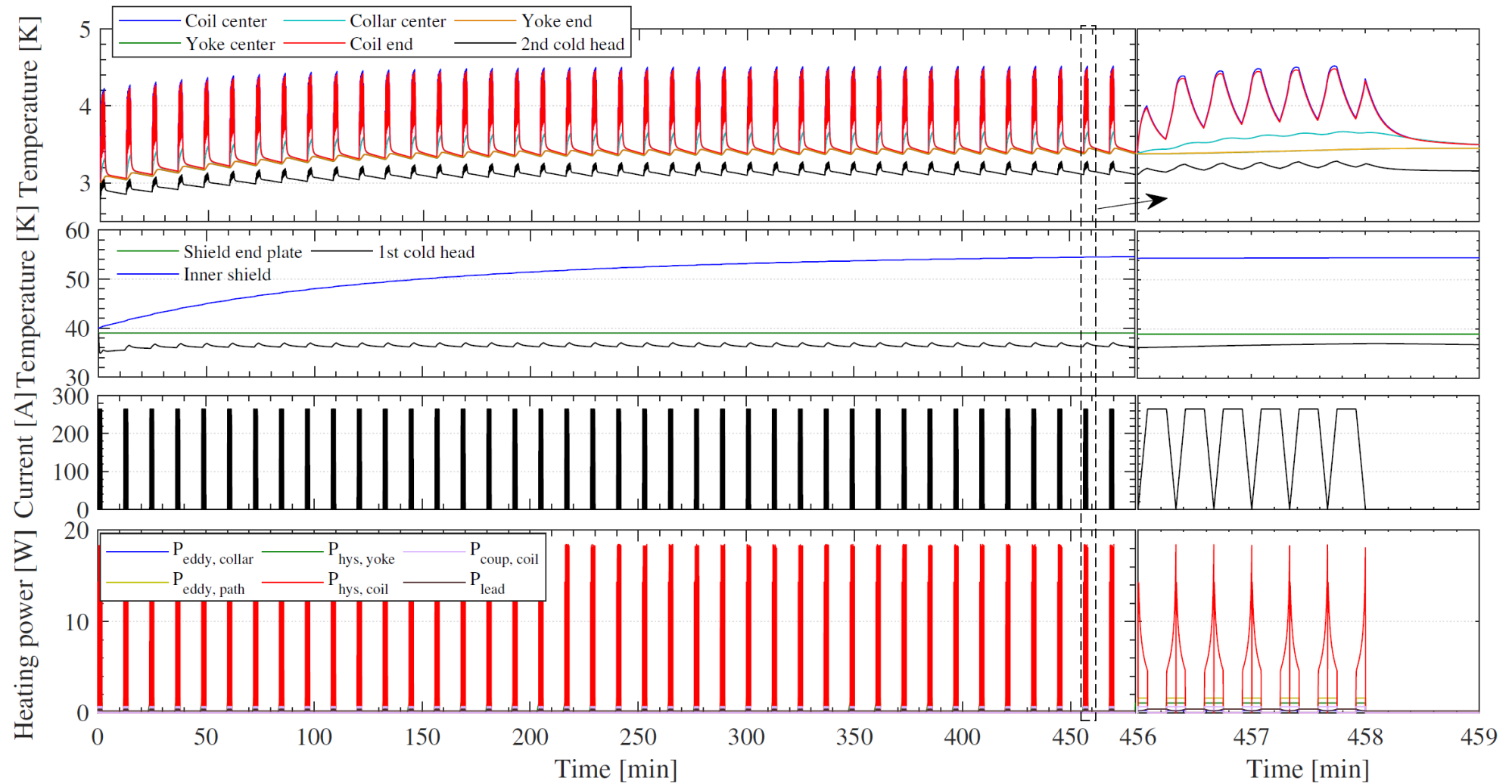


- 8時間の治療運転を仮定
- 1.8Wの4K-GM冷凍機 (RDE-418D4, SHI) を90度偏向電磁石当たり 4~6台搭載予定



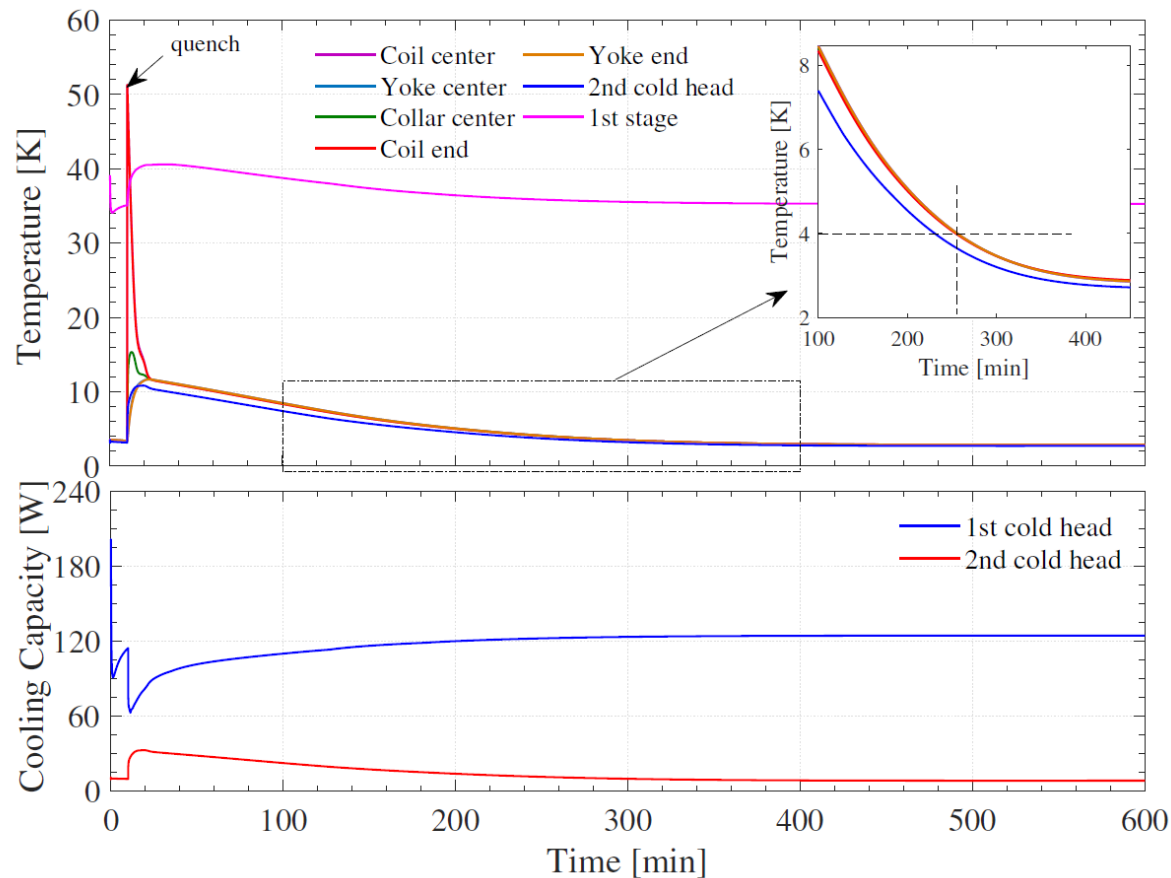
- T_{CS} : 5.82 K

4. 次世代治療装置プロジェクト

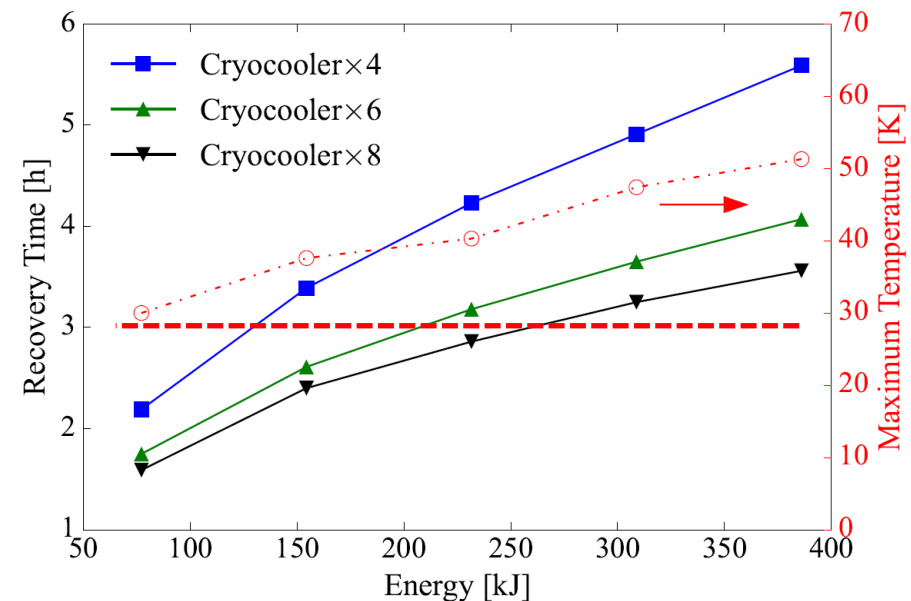


4. 次世代治療装置プロジェクト

クエンチ回復時間の見積り



- クエンチしたら再び運転可能な温度に冷えるまで治療を中断しなければならない
- 治療運用を考えると回復時間は3時間以内が好ましい



1. はじめに
2. 重粒子線治療の課題
3. 超伝導回転ガントリーの開発
4. 次世代治療装置プロジェクト
5. 今後の計画

5. 今後の計画

- ここまでに次世代重粒子線治療シンクロトロン用超伝導電磁石に関する基本的設計を検討してきた。
- 今後も引き続きより詳細な超伝導電磁石の設計検討が進められていく予定である。

- また、治療装置として望まれる性能を達成するためには、シンクロトロン以外の機器や制御系を含む全体システムの検討についても熟慮しなければならない。

5. 今後の計画

- まずは次世代重粒子線治療シンクロトロンの実証機をQST敷地内に建設することが当面の目標である。

