

RCNP AVFサイクロトロン コミッショニングの進展

大阪大学 核物理研究センター

神田 浩樹, 福田 光宏, 依田 哲彦, 安田 裕介, 畑中 吉治, 齋藤 高嶺, 田村 仁志,
森信 俊平, 永山 啓一, 吉田 英智, 阿野 真治, 友野 大, 鎌野 寛之, 青井 考, 嶋 達志,
井手口 栄治, 大田 晋輔, 小林 信之, 古野 達也, 今城 想平, 村田 求基, 山本 康崇,
鈴木 智和, 今 教禎, 森田 泰之, 武田 佳次郎, 原 隆文, 荘 浚謙, Zhao Hang, 橘高 正樹,
松井 昇大朗, 井村 友紀, 渡辺 薫

群馬大学 重粒子医学センター
中尾 政夫

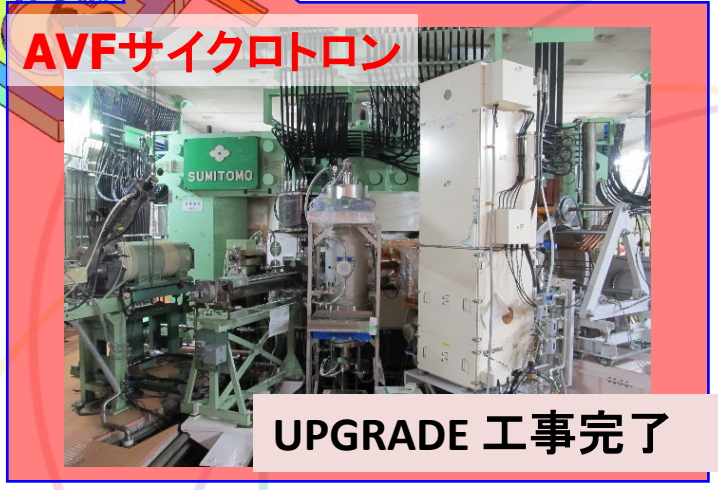
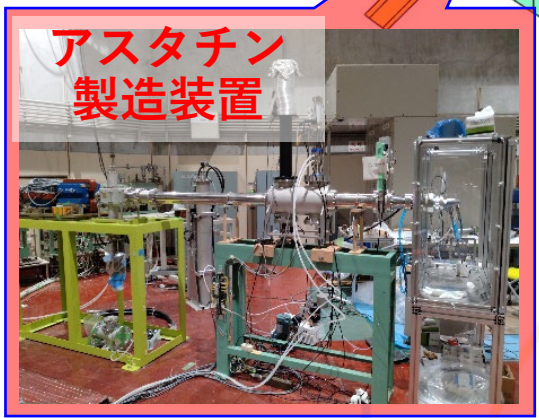
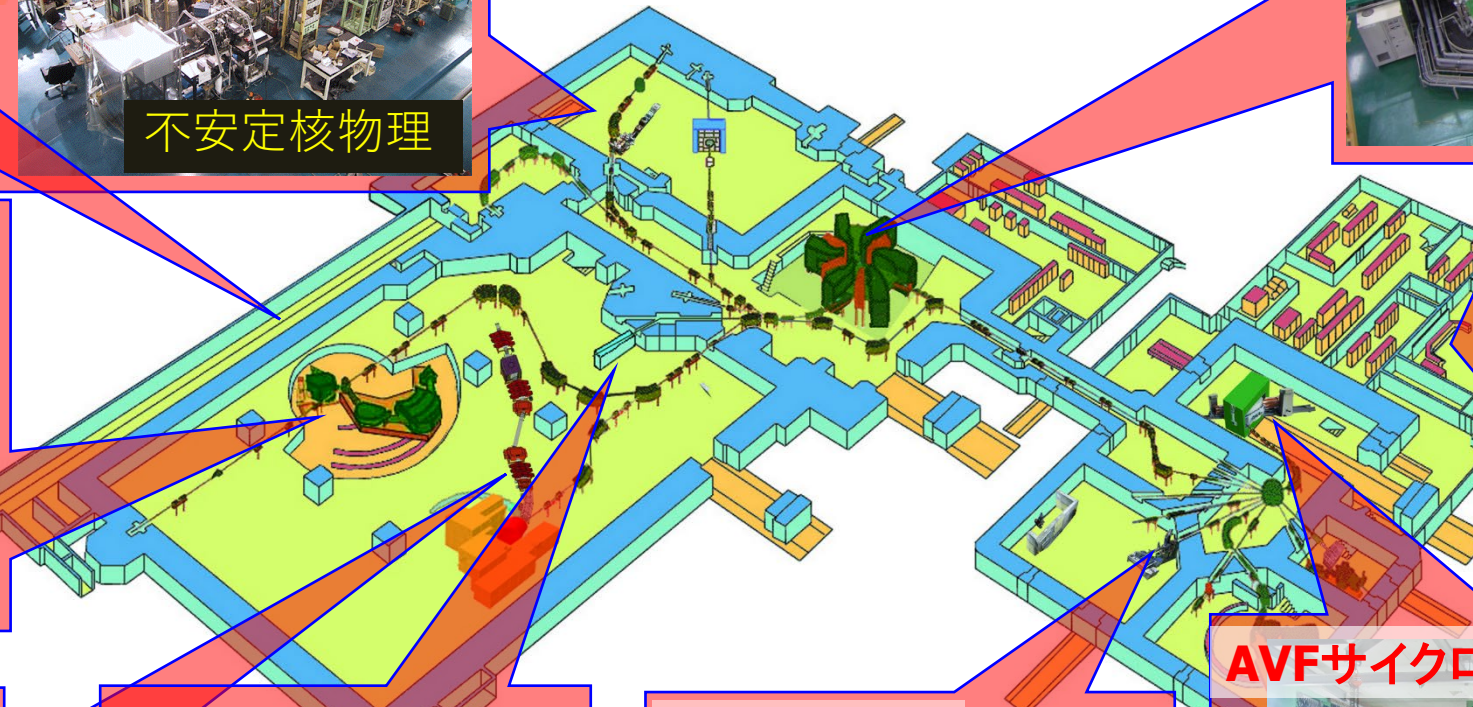
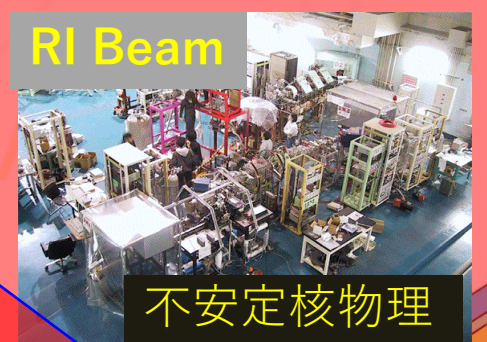
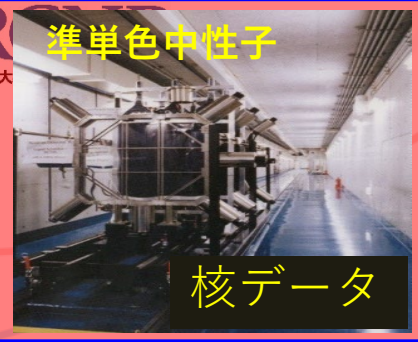
Contents

- RCNPサイクロtron施設
- AVFサイクロtronアップグレードの概要
- ビームコミッショニングの状況
- まとめ

RCNPサイクロトロン施設



RCNPサイクロترون施設



Present K140 AVF Cyclotron (Before Upgrade)

1973 Completed

Proton 10~80MeV

1991 Mainly used as an injector of the ring cyclotron



Present K140 AVF Cyclotron (Before Upgrade)

1973 Completed

Proton 10~80MeV

1991 **Mainly used as an injector of the ring cyclotron**

- Pole diameter : 3300 mm
- Pole gap : 206 ~ 347 mm
- Averaged field : 1.6 T
- Extraction radius : 1000 mm
- Trim coils : 16 pairs
- Valley coils : 3 ~ 5 pairs
- Weight : 400 tons

Acceleration system

- Dee : Single type with 180 degree spanning angle
- Resonator : Coaxial type with a movable short
- Frequency : 6 ~ 19 MHz
- Max. acceleration voltage : 60 kV
- Acceleration harmonics : 1, 3
- Extraction system : Electrostatic deflector, weak-focusing magnetic channel

Ion Sources

- External ion source : Atomic beam type polarized ion source, Room-temperature and superconducting ECR ion sources

Present K400 Ring Cyclotron

1991 Completed

Proton 100~420MeV



Present K400 Ring Cyclotron

1991 Completed

Proton 100~420MeV

Magnet

- Sector magnets : 6
- Pole gap : 60 mm
- Maximum magnetic field : 1.75 T
- Trim coils : 36 pairs
- Injection radius : 2 m
- Extraction radius : 4 m
- Weight : 2200 tons

Acceleration system

- Single gap type cavity : 3
- Frequency : 30 ~ 52 MHz
- Acceleration harmonics : 6, 10
- Max. acceleration voltage : 500 kV
- RF power : 250 kW/cavity

Flat-topping cavity

- Single gap type : 1
- FT harmonics : 3
- Frequency : 90 ~ 156 MHz

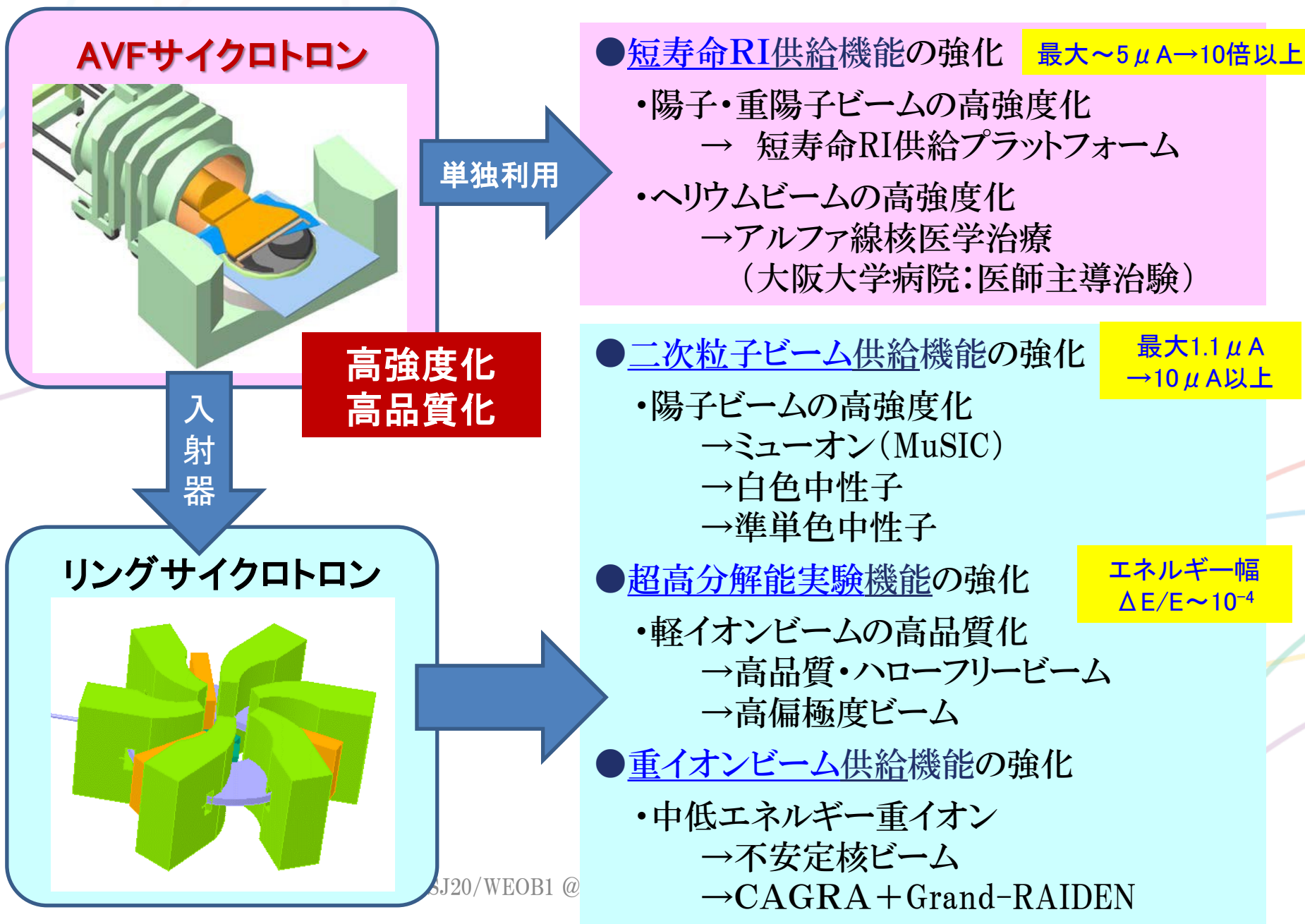
Bypass
beam line

核物理研究センター加速器施設の歩み

- 1962年 日本学術会議が核物理研究所の設置を勧告
- 1971年 全国共同利用センターとして発足
- 1973年 AVFサイクロロン(K=140MeV)完成
- 1976年 共同利用実験開始
- 1985年 サイクロロンカスケード計画を立案
- 1987年 リングサイクロロン施設建設開始
- 1991年 リングサイクロロン(K=400MeV)完成
- 2004～2005年 AVFサイクロロンやビームライン等を部分的に更新・増設
- 2013～2014年 AVFサイクロロン, リングサイクロロン等を部分的に更新
- 2019年度 建屋・設備の部分的な改修**
- 2020年度 AVFサイクロロンの解体・更新**
- 2021年度 AVFサイクロロンの機器調整**
- 2022年度 ビームコミッショニング**
(共同利用・共同研究実験を試験的に開始)
- 2023年度 共同利用・共同研究実験を本格的に再開**
(ビームコミッショニングを並行して実施)

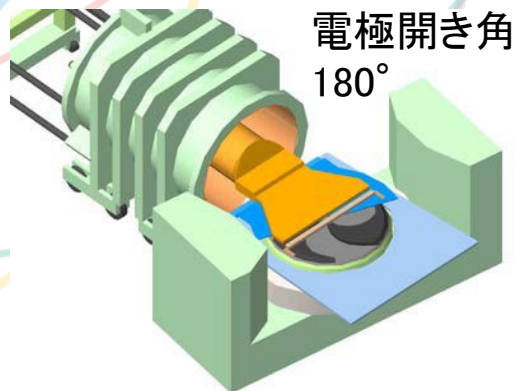
AVFサイクロトロンアップグレードの概要

アップグレードの目的

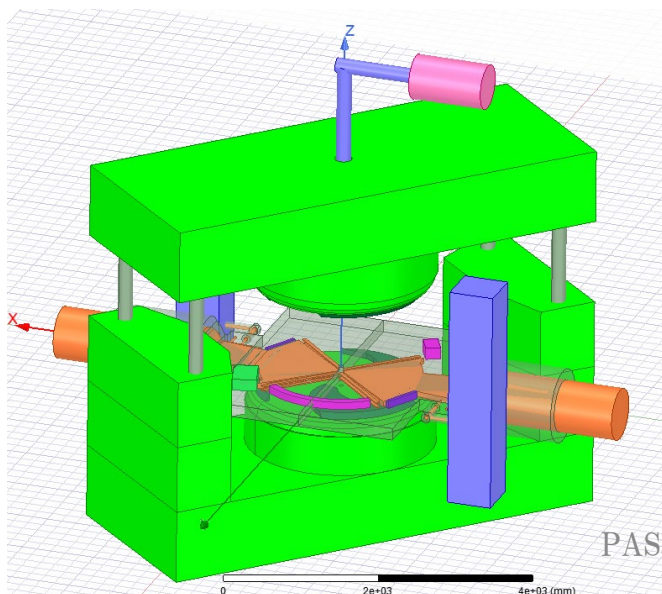


AVFサイクロtron本体アップグレードの基本仕様

(従来) Single Dee電極



(更新後) Double Dee電極



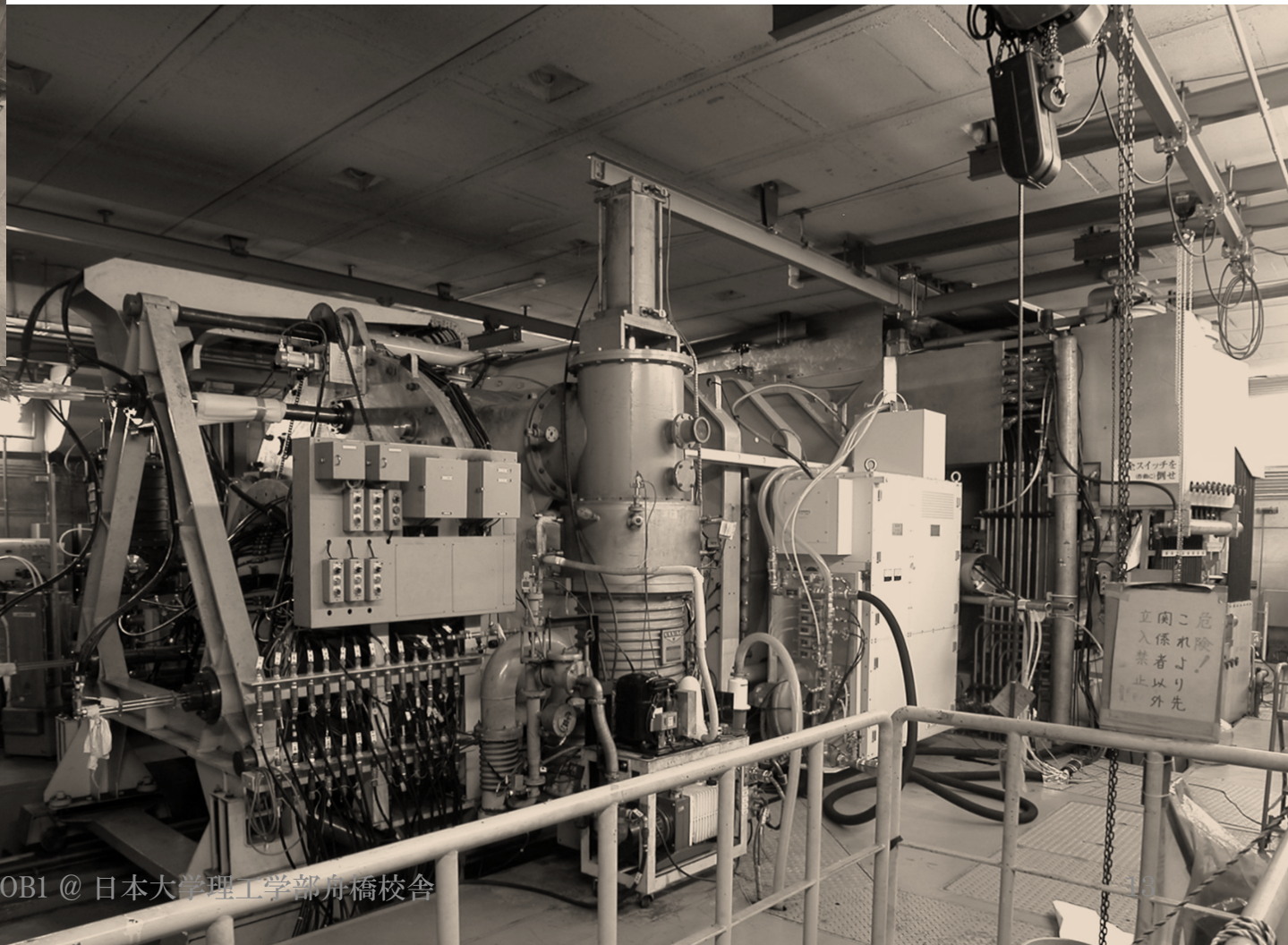
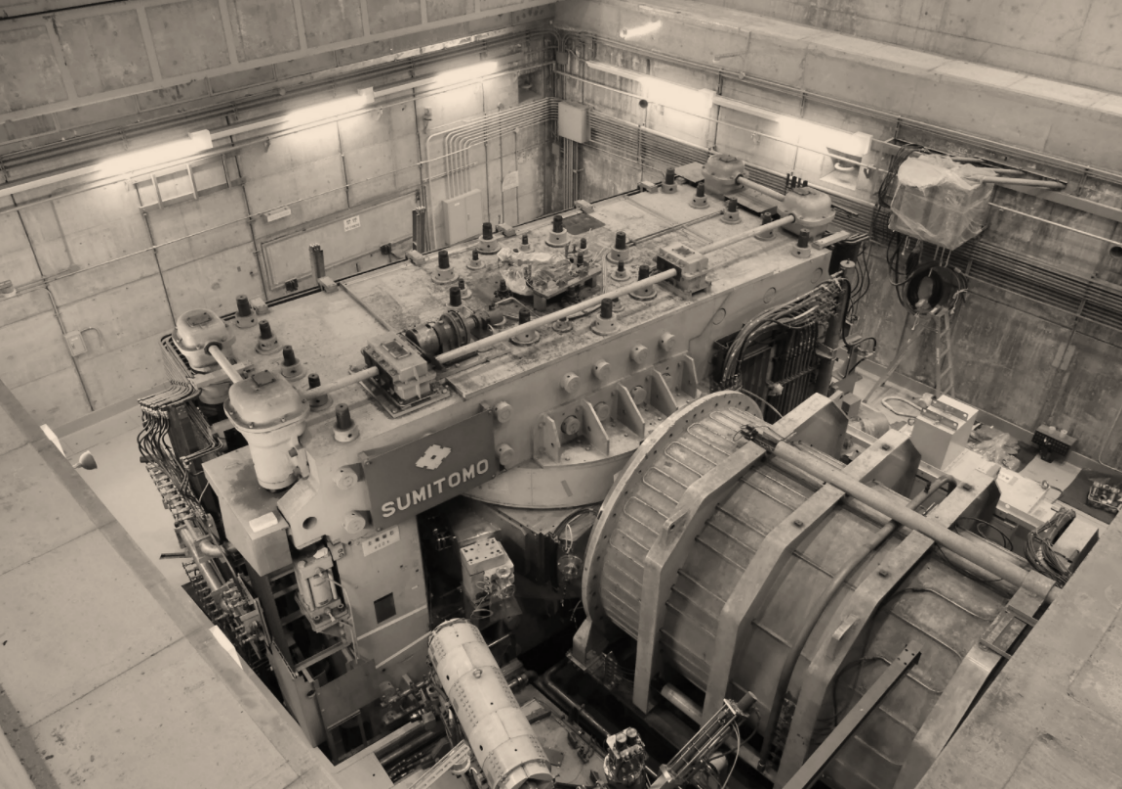
●更新後の基本仕様

- ・K値 : 140 MeV(従来と同じ)
- ・引出半径 : 100 cm(従来と同じ)
- ・最大平均磁場 : 1.65 T(従来と同じ)
- ・加速ギャップ開き角 : 87° (従来180°)
- ・RF周波数 : 17~36 MHz(従来2倍)
- ・加速ハーモニクス : 1, 2, 3, 6 (従来1, 3)

H	粒子	Energy (MeV/n)	Energy gain (従来比)
1	proton	58 ~ 100	1.4倍
2	proton	14 ~ 70	2.0倍
	Heavy Ion	14 ~ 27	2.0倍
3	Heavy Ion	6 ~ 26	1.4倍
6	Heavy Ion	2 ~ 7	2.0倍

- ・イオン源加速電圧 : ~50kV
- ・バンチャー : 高調波重畳型 + 充放電型
※Sub-harmonic bunching
- ・中心領域 : Inflector, phase slit, RF shield etc.
- ・引出領域 : Deflector + Gradient corrector

アップグレード前の AVFサイクロトロン

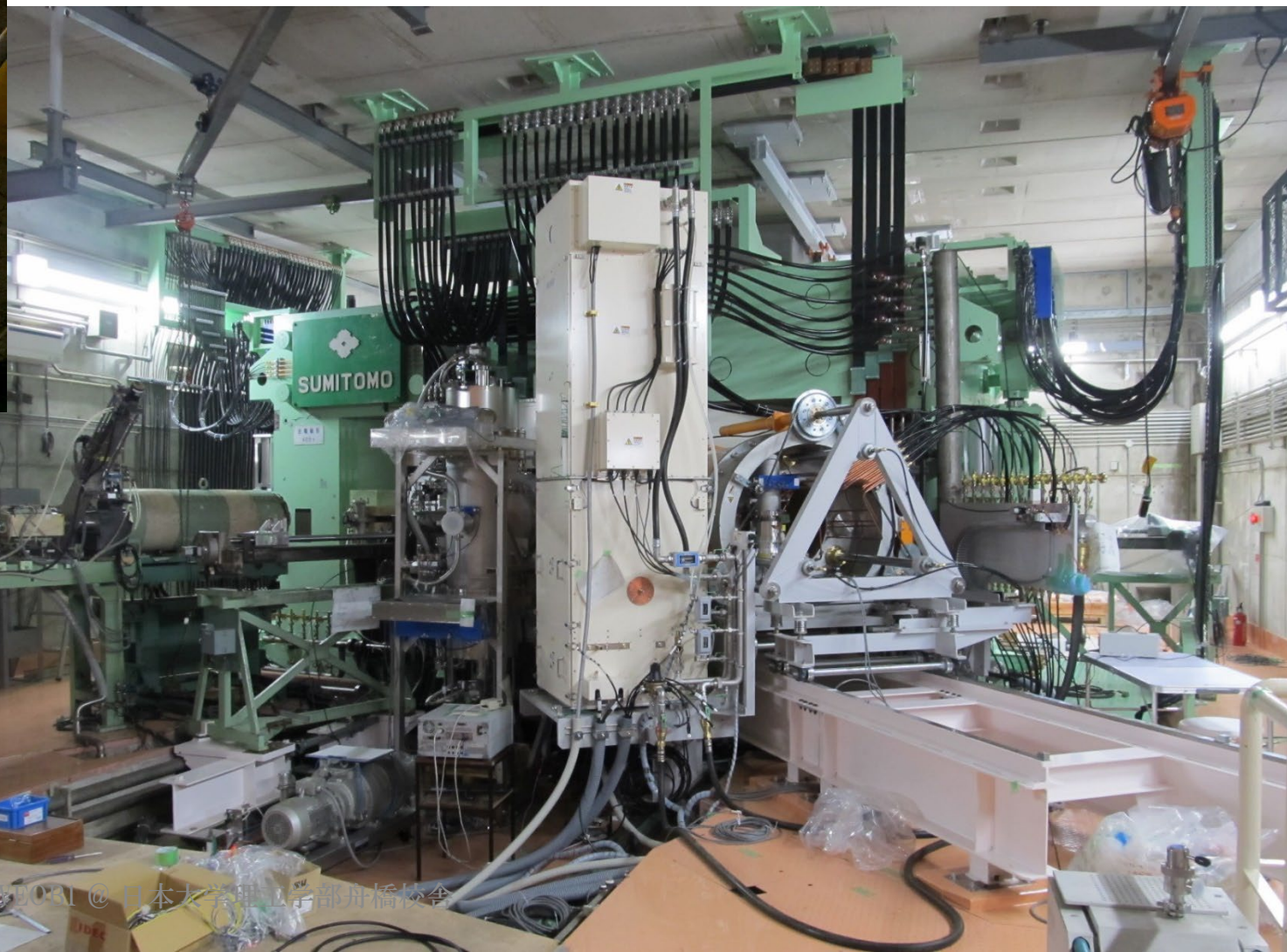


1973年完成

→原子核物理学実験の共同研究に利用
2019年に停止⇒アップグレード工事へ

- 50年弱の間稼働し老朽化
- 原子核物理学研究専用としての設計
 - 高いエネルギー精度
 - 多くのイオン種の加速
 - 一次ビームの利用に適したビーム強度

アップグレード完了



2021年3月 住友重機械工業による工事完成
⇒ 阪大による機材の復旧、コミッショニング
2022年4月21日 First Beam

- 元の性能はそのままに、新しい用途に向けた性能の向上
 - 高いエネルギー精度
 - 多くのイオン種の加速
 - **二次粒子生成、RI製造に対応できる**
高いビーム強度

2023/8/30

PAS/20/V90A1 © 日本女子大学 電子部舟橋校舎

ビームコミッショニングの状況

これまでのビームコミッショニングの経緯

- 2022年
 - 3月16日 運転再開のための変更申請承認
 - 3月31日 AVFサイクロロン中心領域でビーム入射を確認
 - 4月20日 AVFサイクロロンから取り出したビームを確認(陽子65MeV)
 - 5月10日 施設検査に合格(65MeV proton ~90nA + Pulser 1/9間引き)
 - 5月中旬 ビームコミッショニングを本格的に開始し、共同研究実験へ65MeV陽子を供給
 - 5月下旬 高分解能実験のコミッショニングを開始
 - 7月下旬 At-211製造のコミッショニングを開始
 - 10月頭 教育用ビームタイムにビーム供給(陽子65MeV)
 - 10月上旬 リングサイクロロンの運転を再開(陽子392MeV)
 - 11月下旬~12月上旬 半導体デバイス照射試験を実施(陽子392MeV、 $\sim 1 \mu A$)
 - 12月上旬 高分解能調整, MuSICコミッショニング
- 2023年
 - 3月13日 ビーム使用方法変更のための変更申請承認
 - 4月上旬 共同利用実験を本格的に開始(E481、E552 p 65 MeV, 392 MeV)、At-211製造
 - 5月 共同利用実験(E481、E552)、At-211製造
 - 6月 共同利用実験(E583 $4He^{2+}$ 400MeV)、At-211製造($4He^{2+}$ 28.5MeV、 $7 \sim 8 \mu A$)
 - 7月 共同利用実験(E580p、E559、E585)、共同研究実験、教育用BT

加速可能ビームの広がり

- AVFアップグレード完了後より、かつて加速していたエネルギー、未経験のエネルギーでの加速を行えるようにコミッショニングを進めている
 - 2022年度
 - p 65 MeV (AVF)
 - p 65 MeV (AVF) → 392 MeV (Ring)
 - $^4\text{He}^{2+}$ 28.5 MeV (AVF)
 - 2023年度の追加
 - p 40 MeV (AVF) → 230 MeV (Ring)
 - $^4\text{He}^{2+}$ 67 MeV (AVF) → 400 MeV (Ring)
 - $^4\text{He}^{2+}$ 100 MeV (AVF)
- 各種のエネルギーに対応したRF周波数の励振を可能に

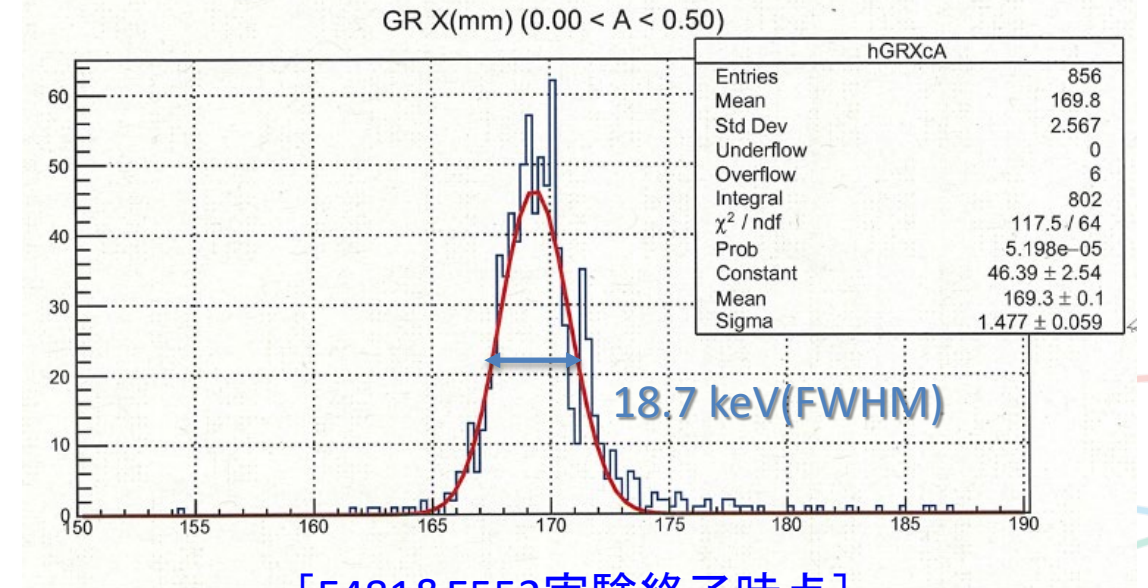
RF周波数帯域に応じてパワーフィーダー同軸管の長さを変更



陽子ビーム 65 MeV の分解能調整

- AVFサイクロトロンのみでの性能の確認
- Achromatic transportation
- グランドライデンを分解能測定に使用
- 分解能測定の簡便化と自動調整の試み
 - グランドライデンの分解能測定操作をワンクリックに
 - 加速器オペレーターのみで作業可能
 - 機械学習による分解能調整のための学習用データの取得
 - 機械学習によりスリットの通過量を確保しつつエネルギー幅の狭くなる調整パラメータを見出した
- 分解能の参考値としては2015年に 23 keV (FWHM) という値が得られていたので、同程度のレベルになったといえる

グランドライデン焦点面検出器の通過位置 = エネルギー



[E481&E552実験終了時点]

$\Delta E \sim 13 \text{ keV (FWHM)}$, $\sim 1 \text{ nA}$

$\Delta E/E \sim 0.02\%$

[加速器調整後]

$\Delta E \sim 19 \text{ keV (FWHM)}$, $\sim 24 \text{ nA}$

$\Delta E/E \sim 0.03\%$

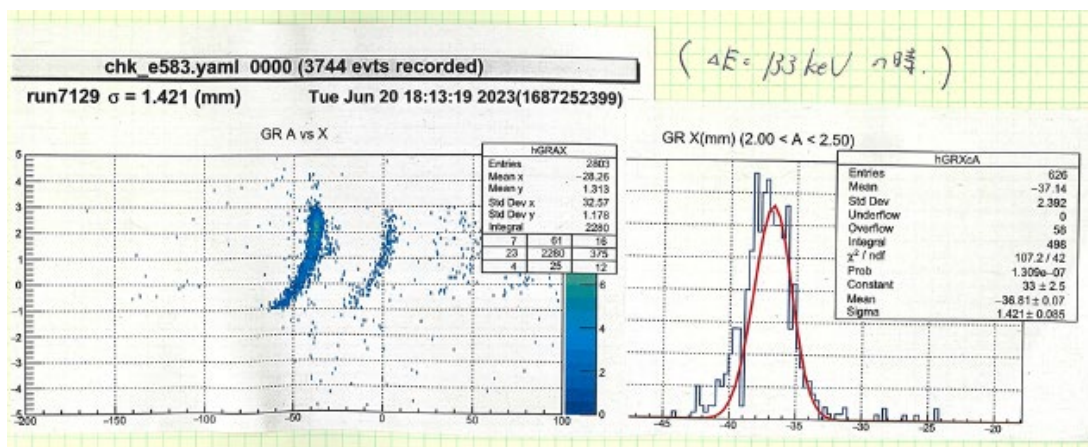
${}^4\text{He}^{2+}$ 400MeVの分解能調整

- リングサイクロトロン of 性能の確認
- Achromatic transportation
- 分解能の参考値としては2015年に 175~270 keV (FWHM)という値が得られていたので、同程度のレベルになったといえる

E583 Garg

[6月20日調整時]

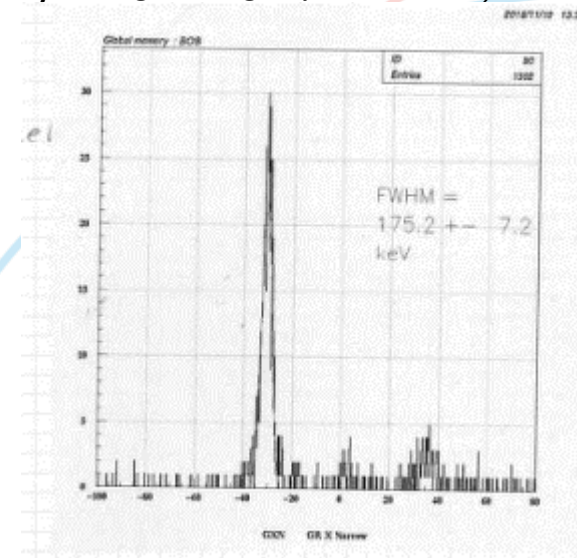
$\Delta E = 140 \sim 210$ keV FWHM
($\Delta E/E = 0.4 \sim 0.5\%$ FWHM)



【参考】 E495 Garg

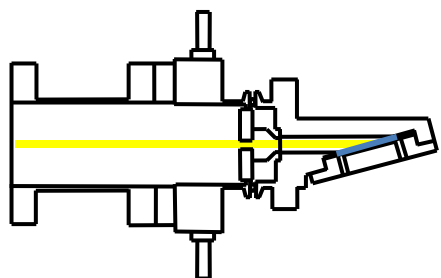
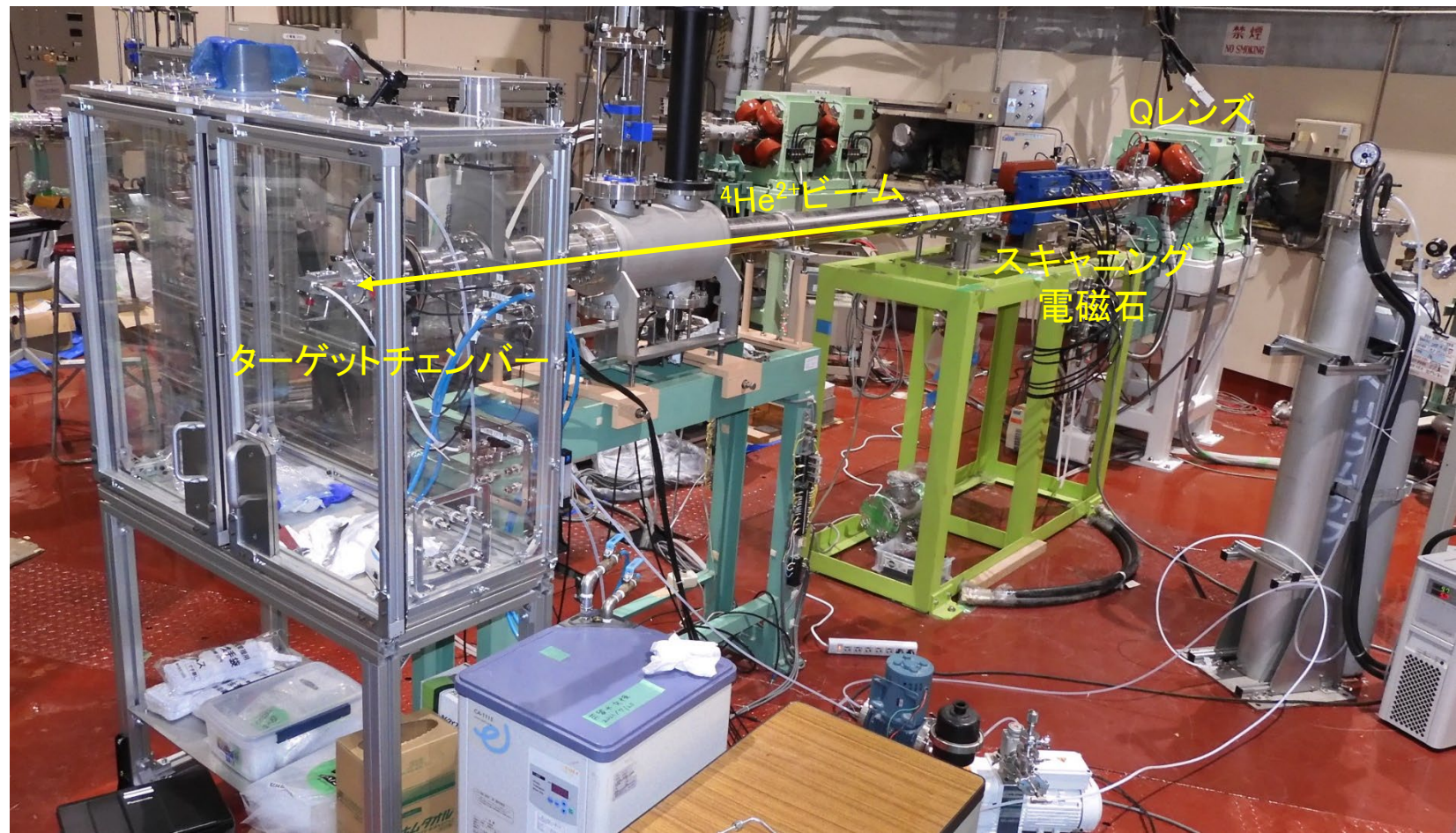
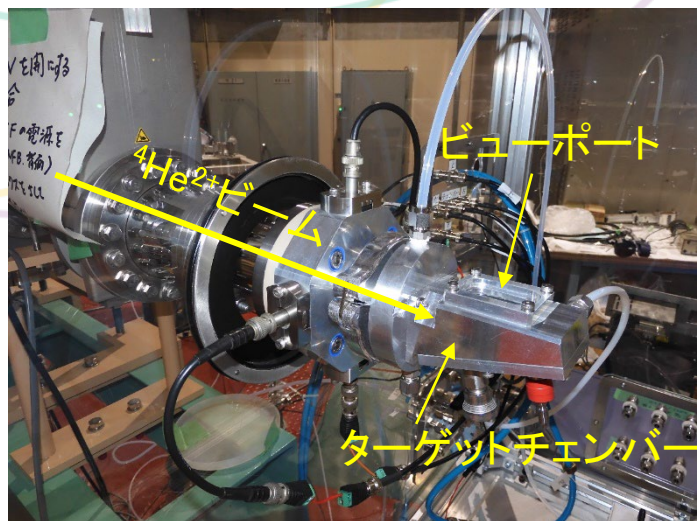
[2018/11/10調整時]

$\Delta E = 175 \sim 270$ keV FWHM
($\Delta E/E = 0.4 \sim 0.7\%$ FWHM)



At-211製造用ビームラインと照射装置

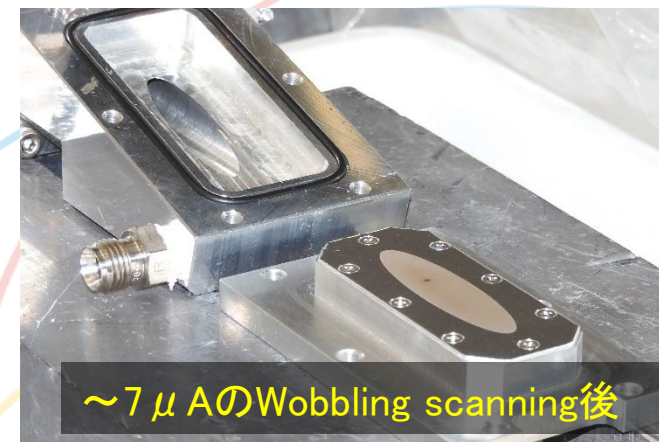
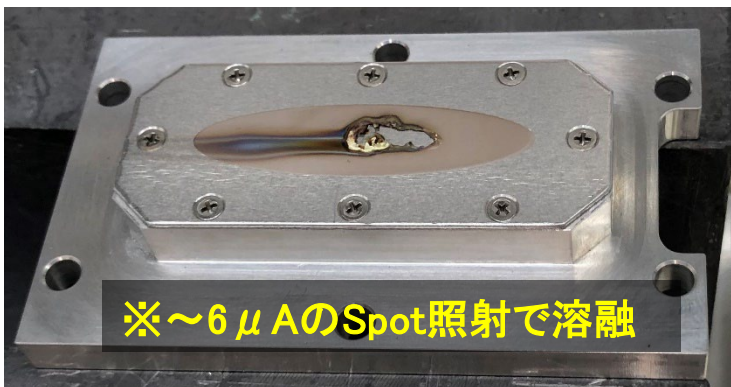
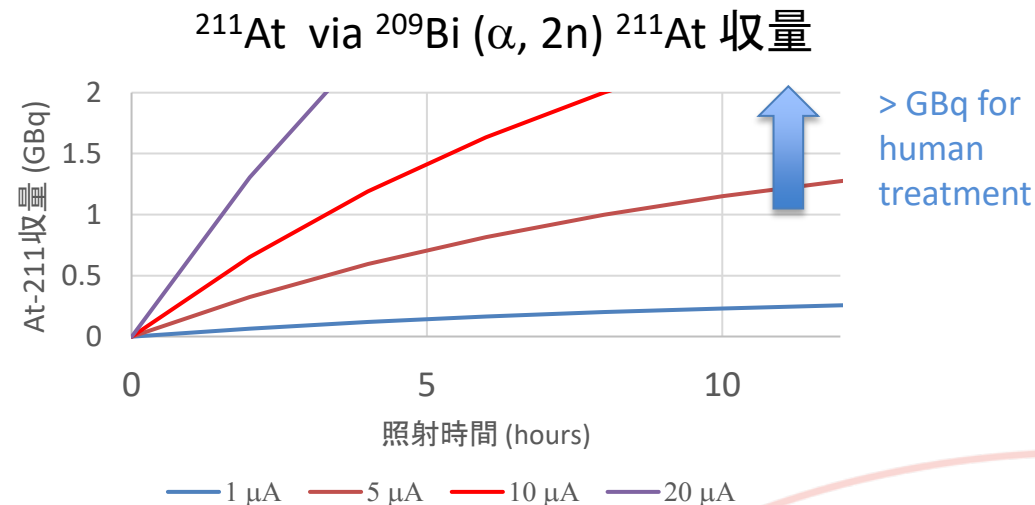
- M実験室 Fコース
- ビームコースを刷新。スキャニング電磁石を導入
- ターゲットチェンバーを更新



水平位置から
15° 傾けた標的に
 $^4\text{He}^{2+}$ ビームを照射
→熱の分散

^{211}At の大量製造に向けたビーム強度増強

- 人への投与(医師主導治験)のための大量製造に向けた準備を行っている。GBq オーダーの製造量が必要
- 半減期が7.2時間と短寿命であることから、大量製造のためには長時間照射ではなく大強度ビームが必要
- $^4\text{He}^{2+}$ 28.5 MeV
- RF加速周波数 35.197MHz, 加速モードh=6
- イオン源 加速電圧14.5kV @NEOMAFIOS
- ビーム電流値 $\sim 7.8 \mu\text{A}$ @ターゲット



まとめ

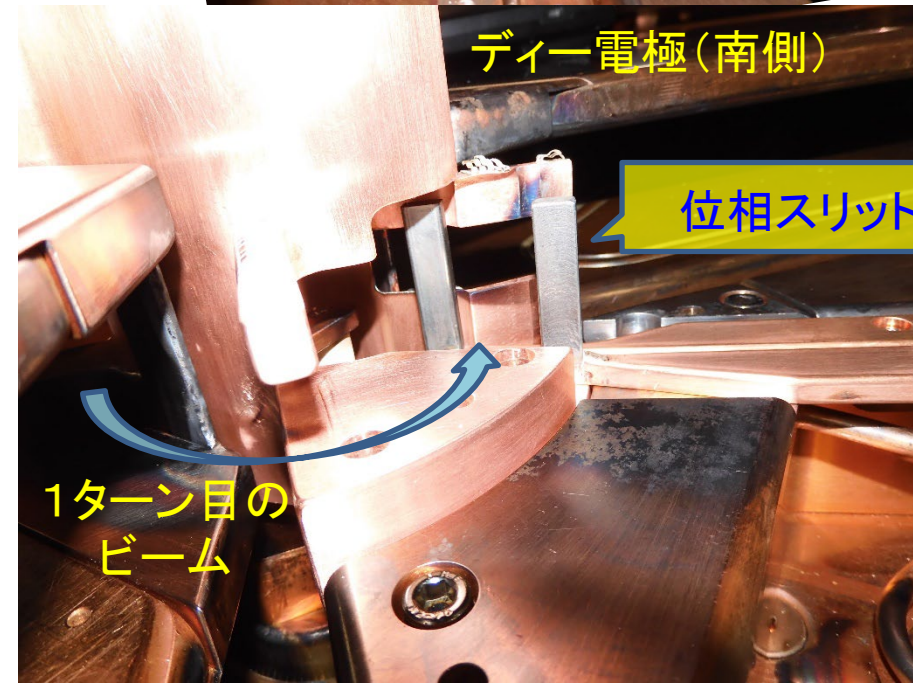
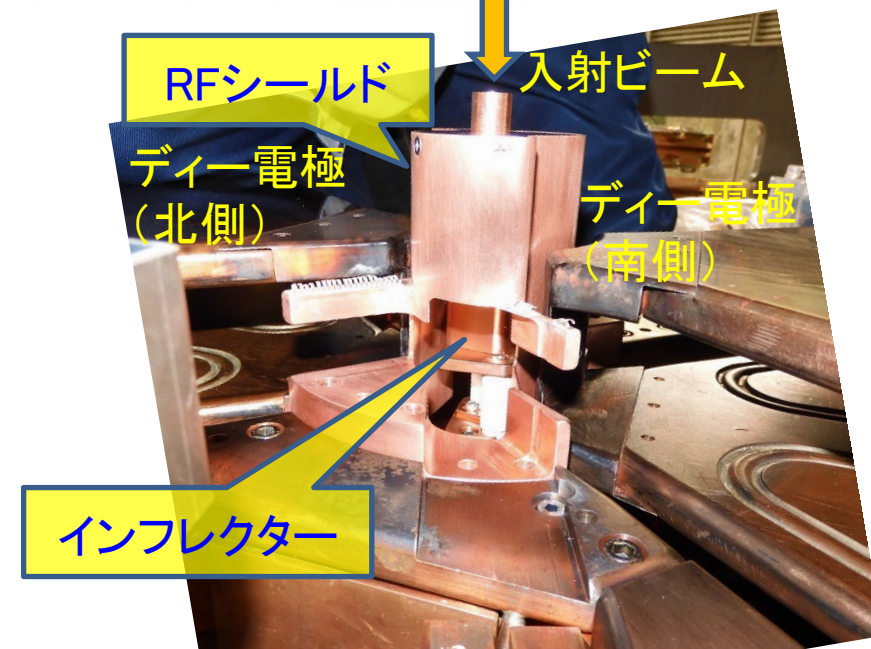
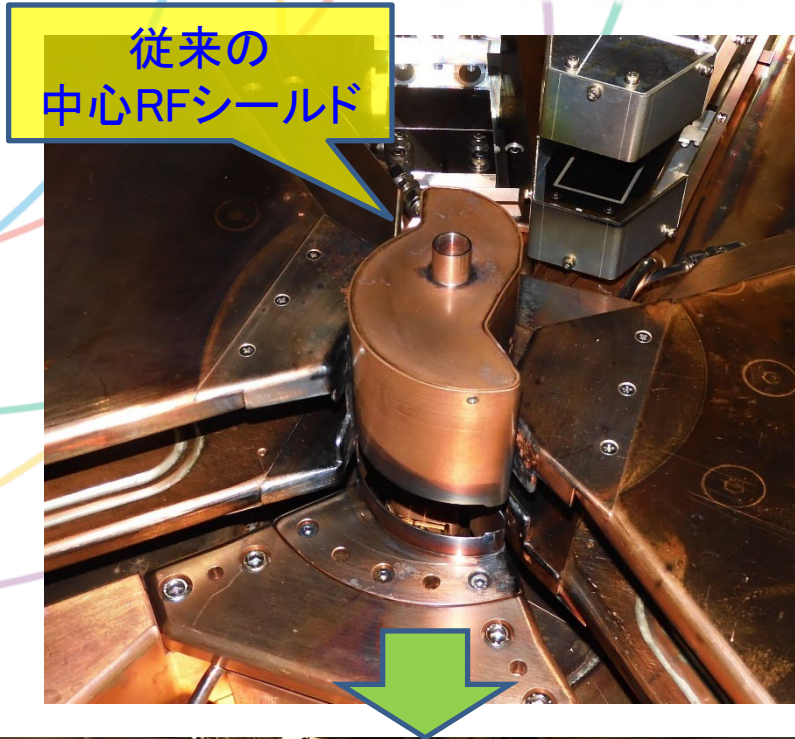
- 大阪大学核物理研究センターのK140 AVFサイクロトロンアップグレード作業完了(2021年)後、機器のコミッショニング、ビームコミッショニングとビーム利用を進めている
- 利用可能なイオンは現状では $^1\text{H}^+$ と $^4\text{He}^{2+}$ で、それぞれの利用者の希望に応じて加速エネルギーの種類を増やしてきた
- Achromatic transportation におけるビームの分解能調整
 - 分解能測定の簡便化、機械学習の導入準備
 - AVF、リングサイクロトロンともにアップグレード作業前と同程度かそれをやや超えるレベルに達している
- ^{211}At (半減期 7時間)製造のための $^4\text{He}^{2+}$ ビームは、人への投与に向けた大量製造(> 数百 MBq)のためビーム強度が重要
 - 現在約 $7.8 \mu\text{A}$ にて製造可能に

BACKUP

位相スリットとメインプローブのRF対策を強化



中心領域のRFシールドを強化



ダミーディー電極外周部のRFシールドを強化

