

次世代イオンビームの活用術

「多様なイオンによる高精度自在な照射技術の開発」

日本原子力研究開発機構(JAEA)
放射線高度利用施設部
ビーム技術開発課
神谷富裕



次世代のイオンビーム活用術

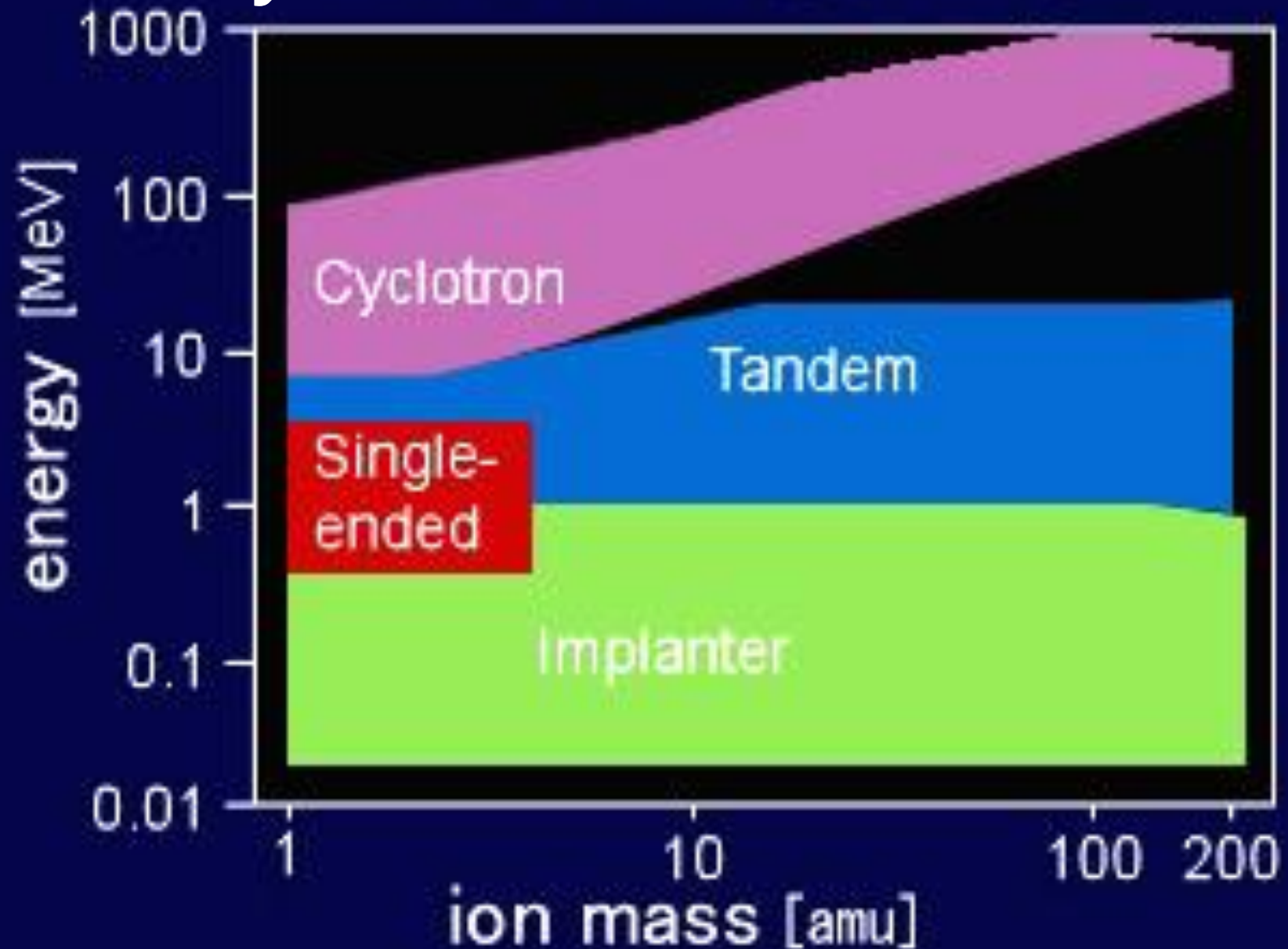
Outline

- 背景
- 研究開発の概要
- これまでの成果
- 今後の展望



研究開発の背景

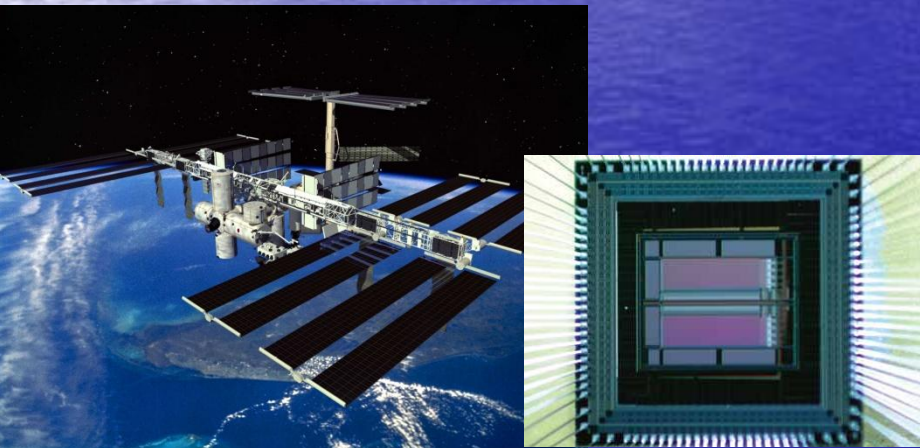
Variety of ion beams in TIARA



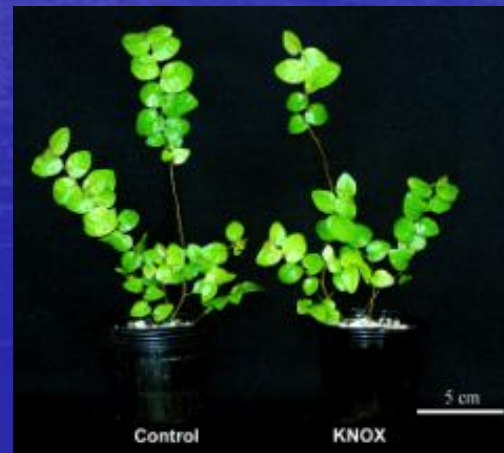
イオンビーム応用(宇宙、バイオ)

耐放射線性(宇宙環境模擬)

突然変異誘発(イオンビーム育種)



宇宙用デバイスの信頼性・寿命評価



ヒメイタビの新品種

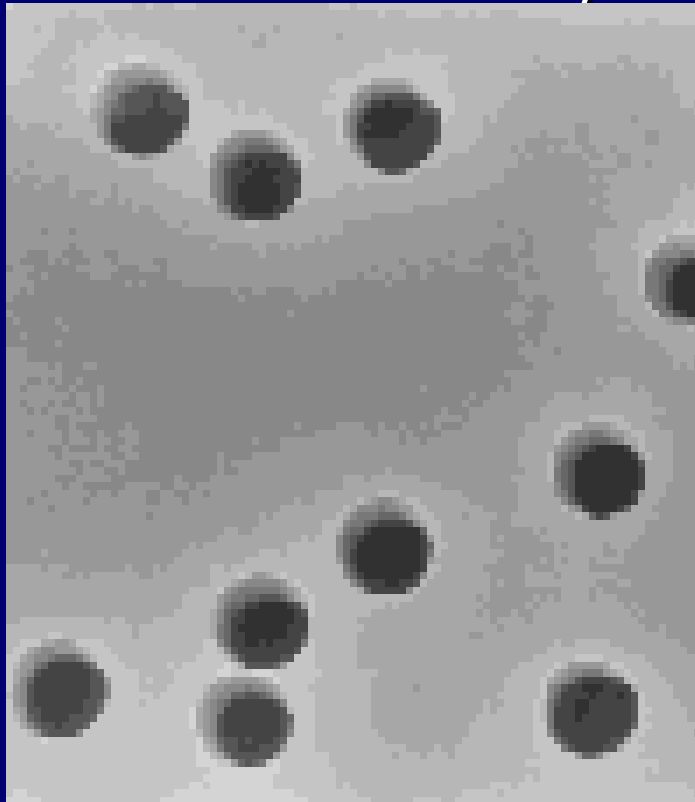


カーネーションの
新品種

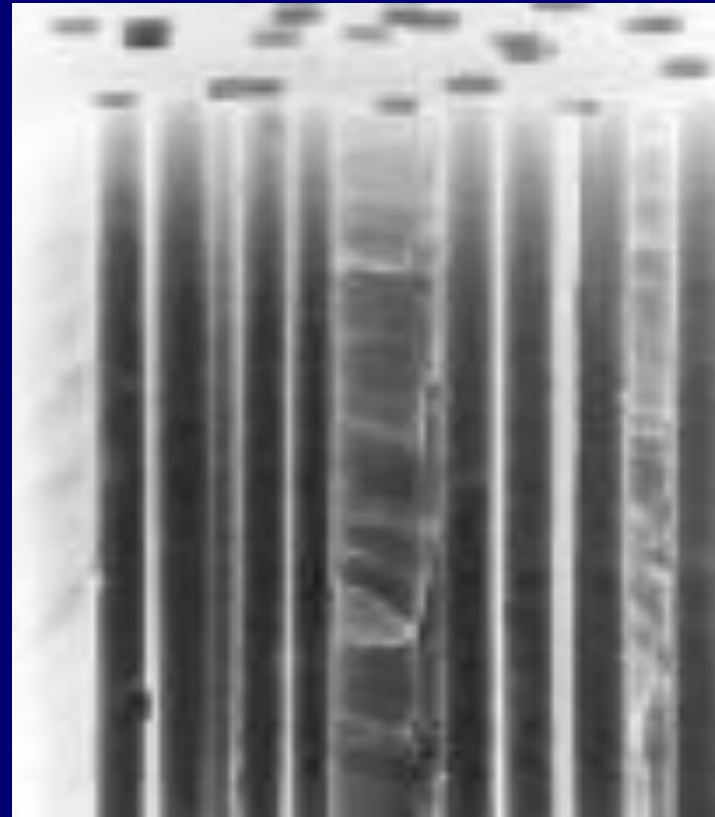
Nano-fabrication by single ions

Etch-pit membrane

$\phi \sim 100$ nm

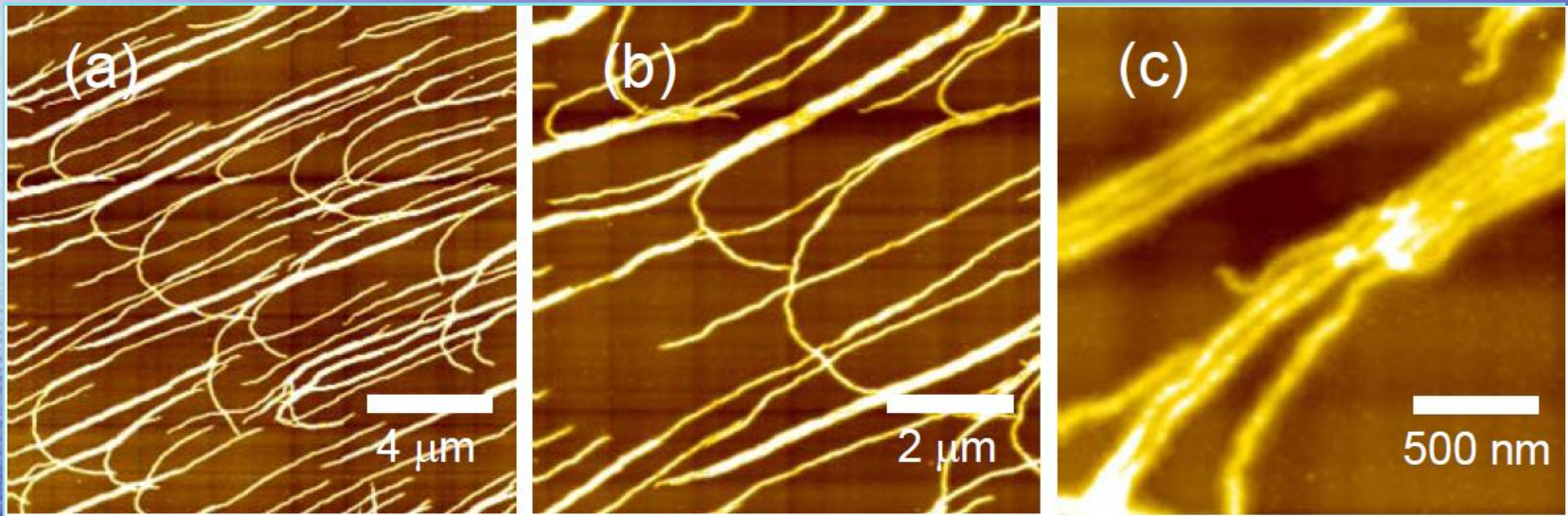


Surface



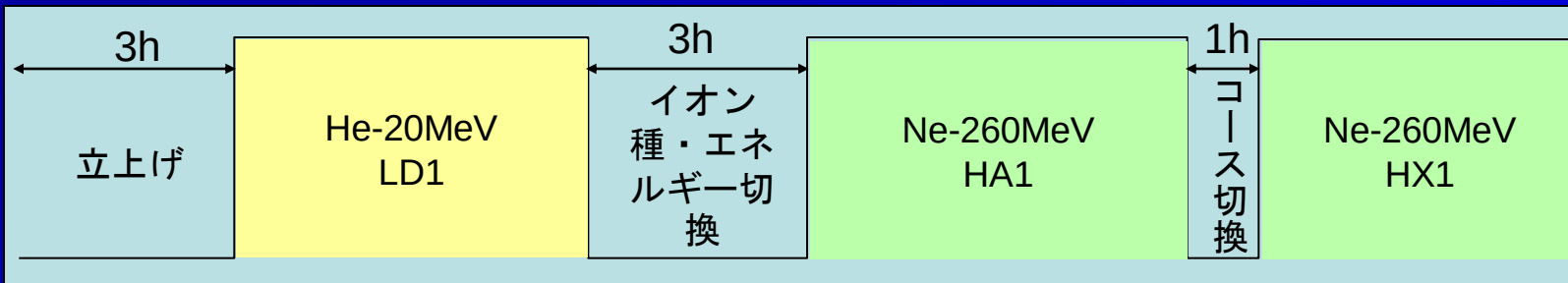
Section

シングルイオンによるナノワイヤ形成

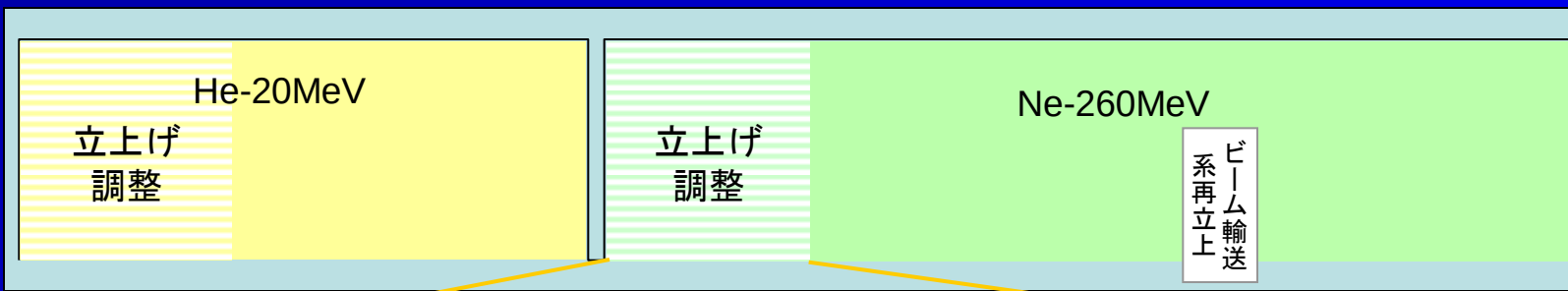


AFM image of nanowires based on SU-8
obtained by irradiation of 400 MeV Kr ions
from the AVF cyclotron

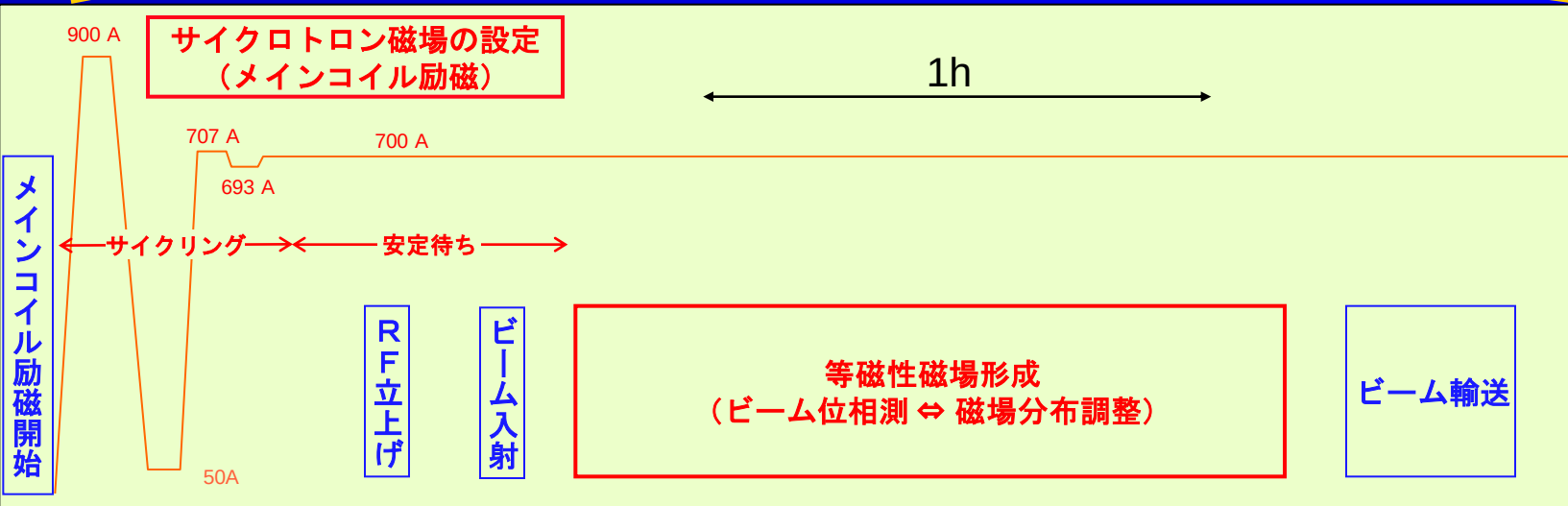
マシンタイム
配分



サイクロトロンの
運転



立上げ
調整



研究開発の成果

研究体制

研究推進協議会(仮称)

日本原子力研究開発機構

研究責任者 神谷

放射線高度利用施設部
TIARA

(幹事機関)

研究推進協議会
事務局

量子ビーム応用研究部門
高崎地区

大阪大学

福田

大阪大学

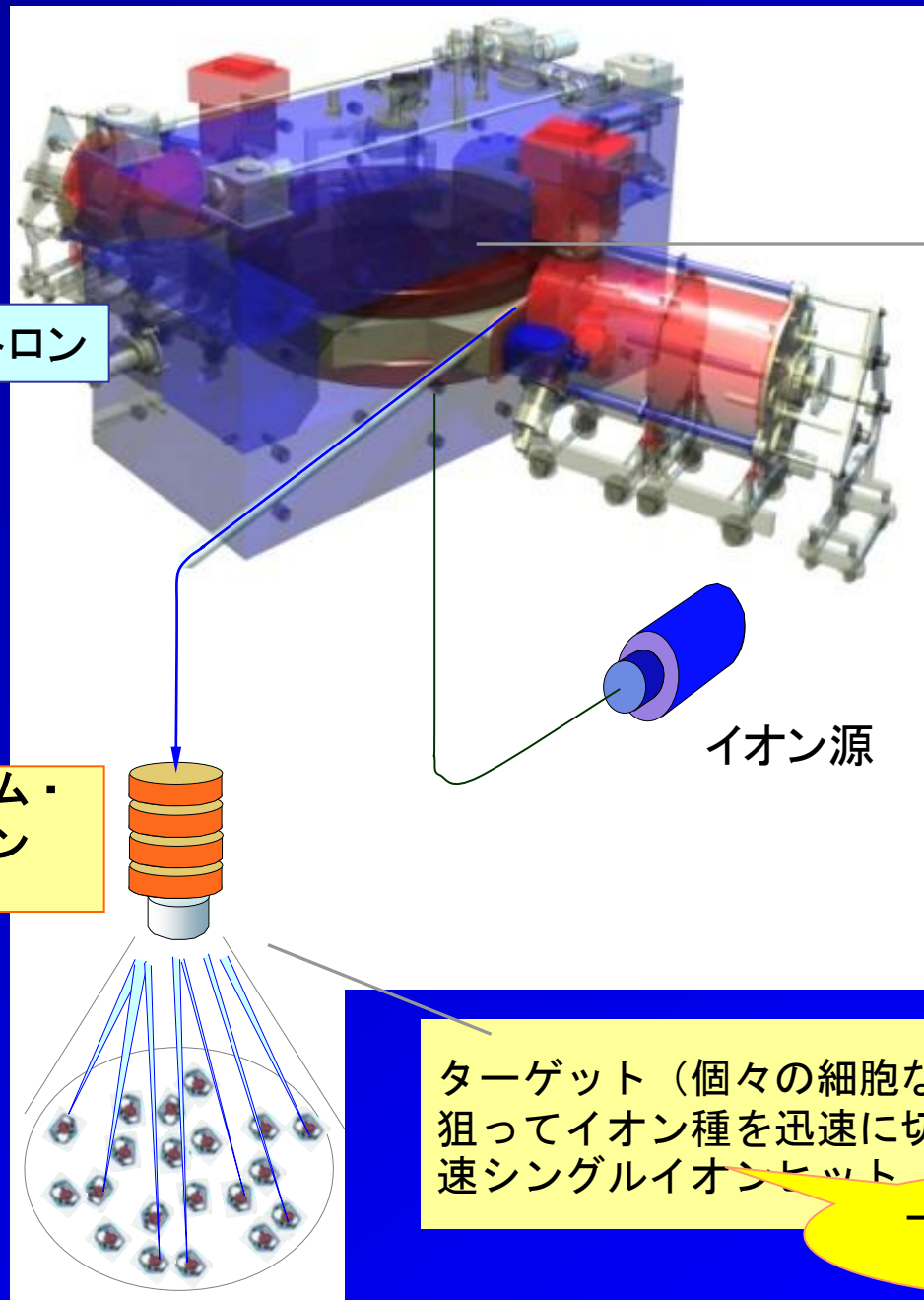
関

宇宙航空機構
久保山

放医研

古澤

1. 全体計画



サイクロトロン磁場の迅速設定：

ビーム位相、磁場の測定データから等時性磁場を形成するコイル電流を自動的に設定



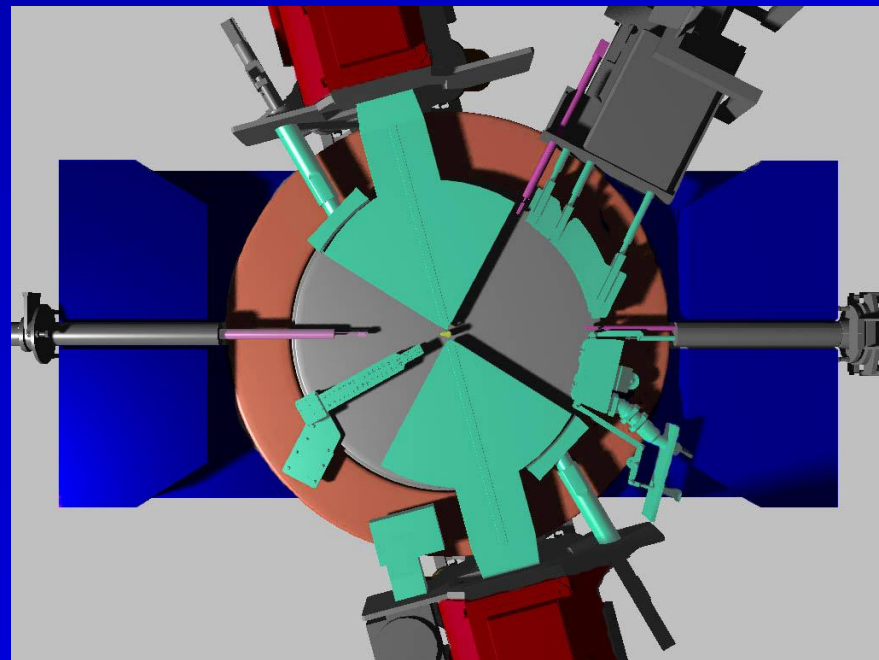
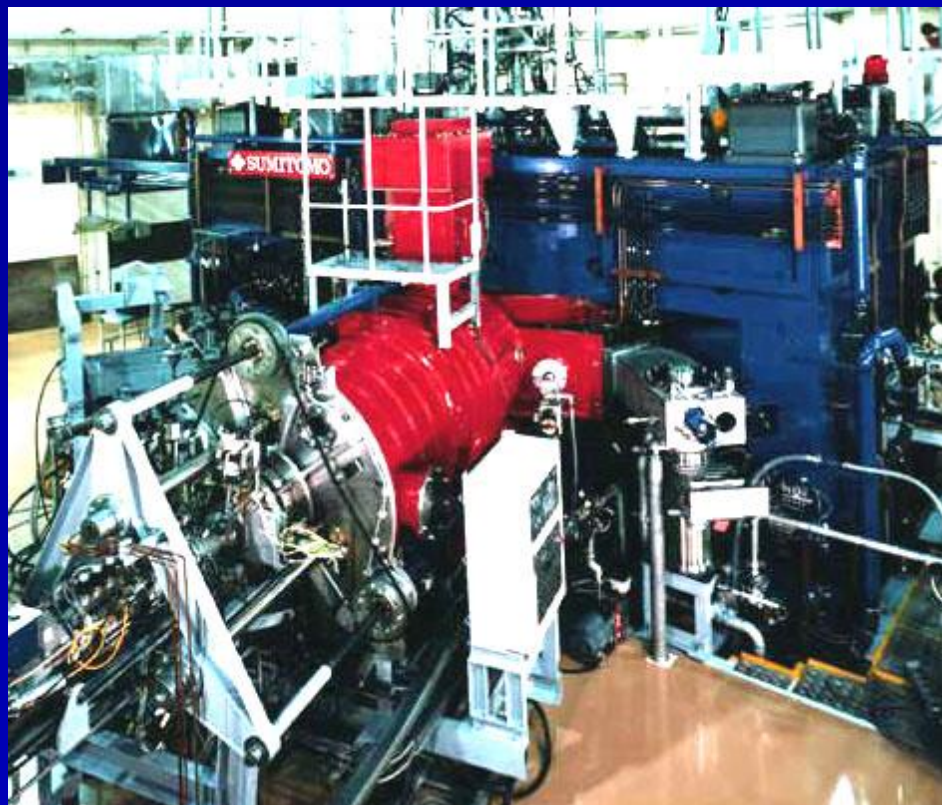
システム開発
原子力機構

磁場・熱・ビーム軌道解
析 大阪大学

原子力機構

一般のビーム利用
でも迅速切換え

2. TIARAサイクロトロン of 概要



AVFサイクロトロン (930型)

$K_b=110\text{MeV}$

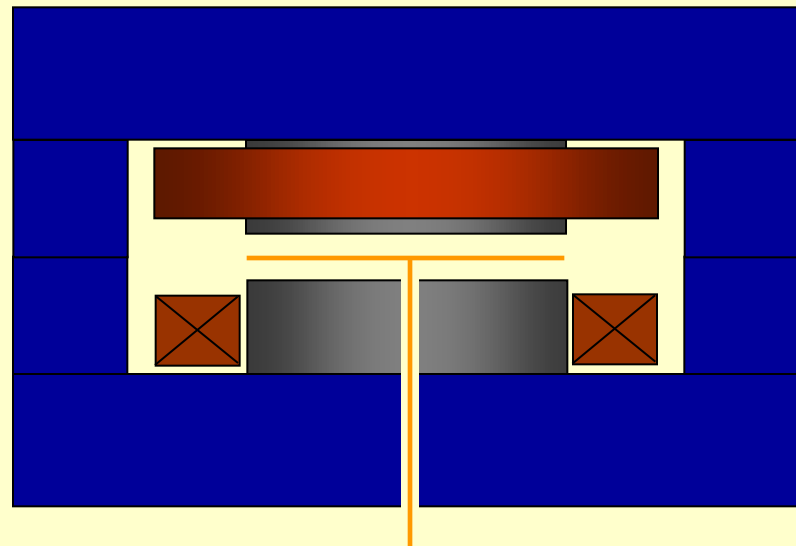
最大平均磁場=1.64T

引出し半径=923mm

加速高周波=11~22MHz

ハーモニクス=1, 2, 3 デー電極数=2

重量=220t



研究開発の全体計画(H20～H24)

R&D テーマ	H20年度 (2008)	H21年度 (2009)	H22年度 (2010)	H23年度 (2011)	H24年度 (2012)
磁場の 短時間 切換	【原子力機構】 ・磁場計測システム 【阪大】 ・3次元磁場解析	【原子力機構】 ・鉄心温度制御 ・主磁場立上げプロセスの最適化 【阪大】 ・3次元磁場・熱構造解析	【原子力機構】 ・磁場自動制御 ・主磁場立ち上げプロセスの最適化 【阪大】 ・3次元渦電流磁場解析	【原子力機構】 ・加速ビーム位相迅速計測 【阪大】 ・ビーム位相フィードバックシステム	【原子力機構】 ・等時性磁場自動形成 【阪大】 ・ビーム引出軌道最適化システム
M/Q分 解能の 向上				【原子力機構】 ・加速位相制御 【阪大】 ・M/Q高分解能化のためのトリムコイル磁場解析	【原子力機構】 ・ビームチョッピングシステム 【阪大】 ・M/Q分解能解析・軌道解析

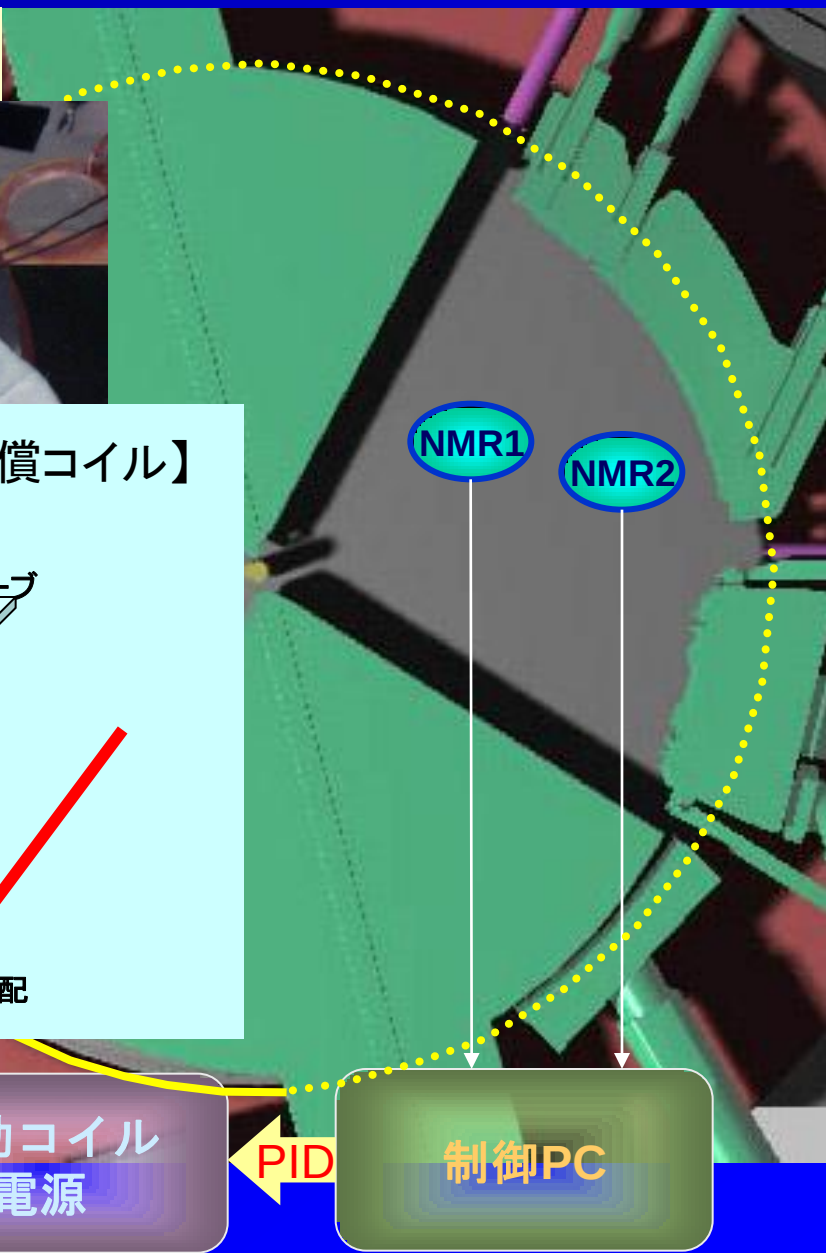
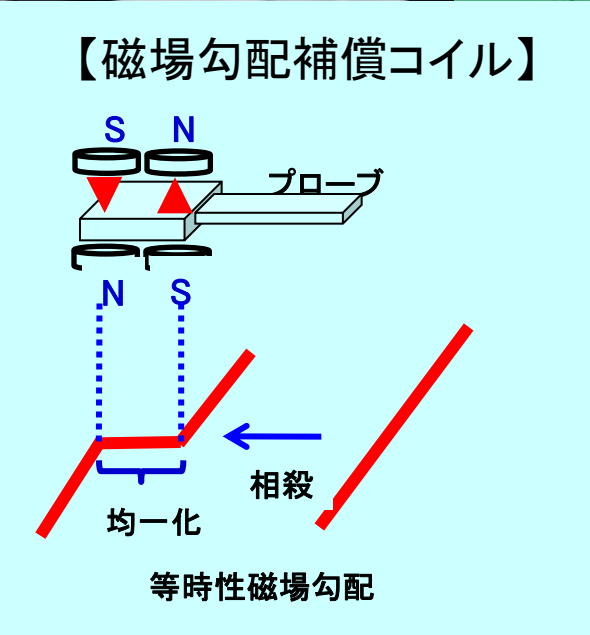
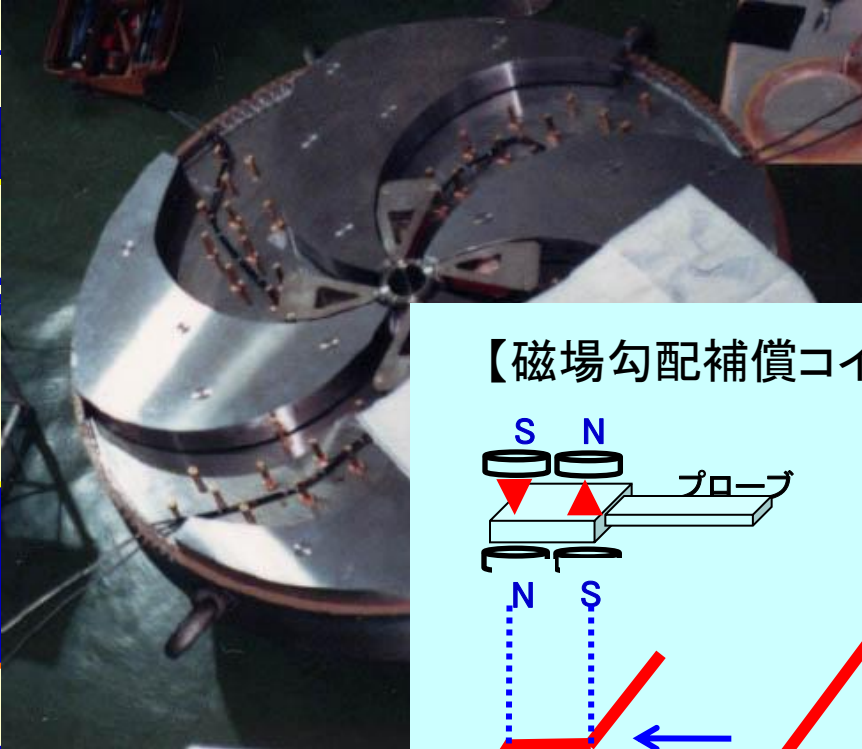
サイクロトロン磁場の短時間設定技術

サイクロトロン磁場の短時間設定技術

目標：
 $\Delta B/B \sim 10^{-5}$

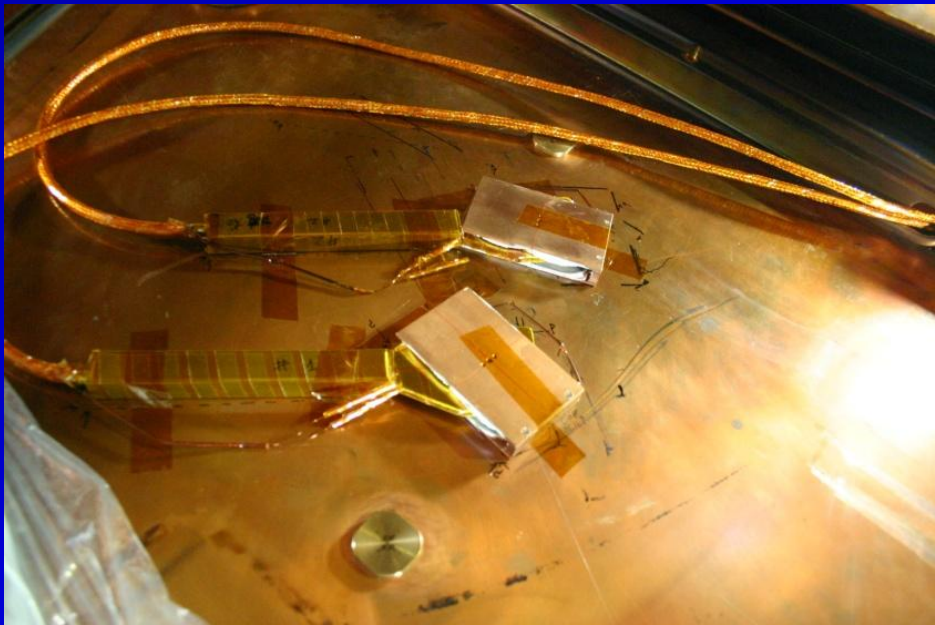
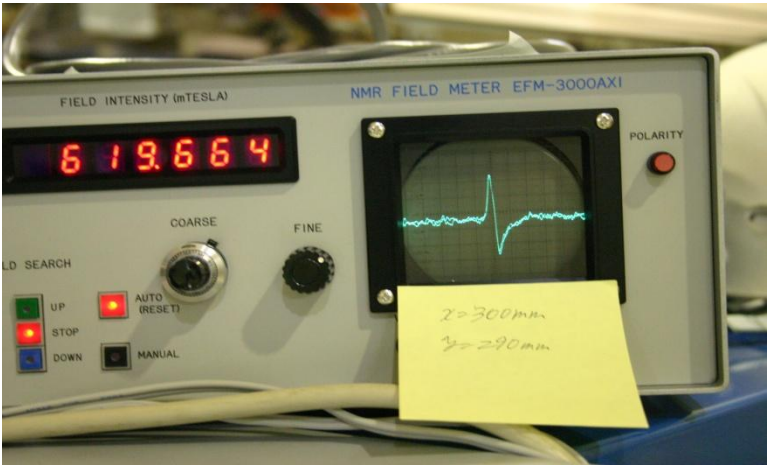
現在：
励磁パターン

- ・ 新たな励磁パターンの
- ・ 測定磁場 → アクティブ制御



3. サイクロトロン磁場の短時間設定技術

10MeV - H

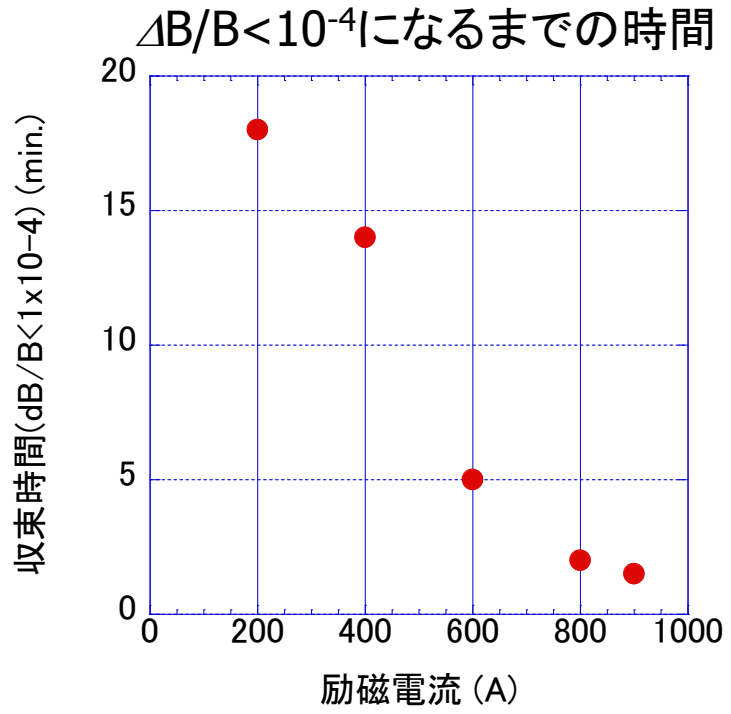
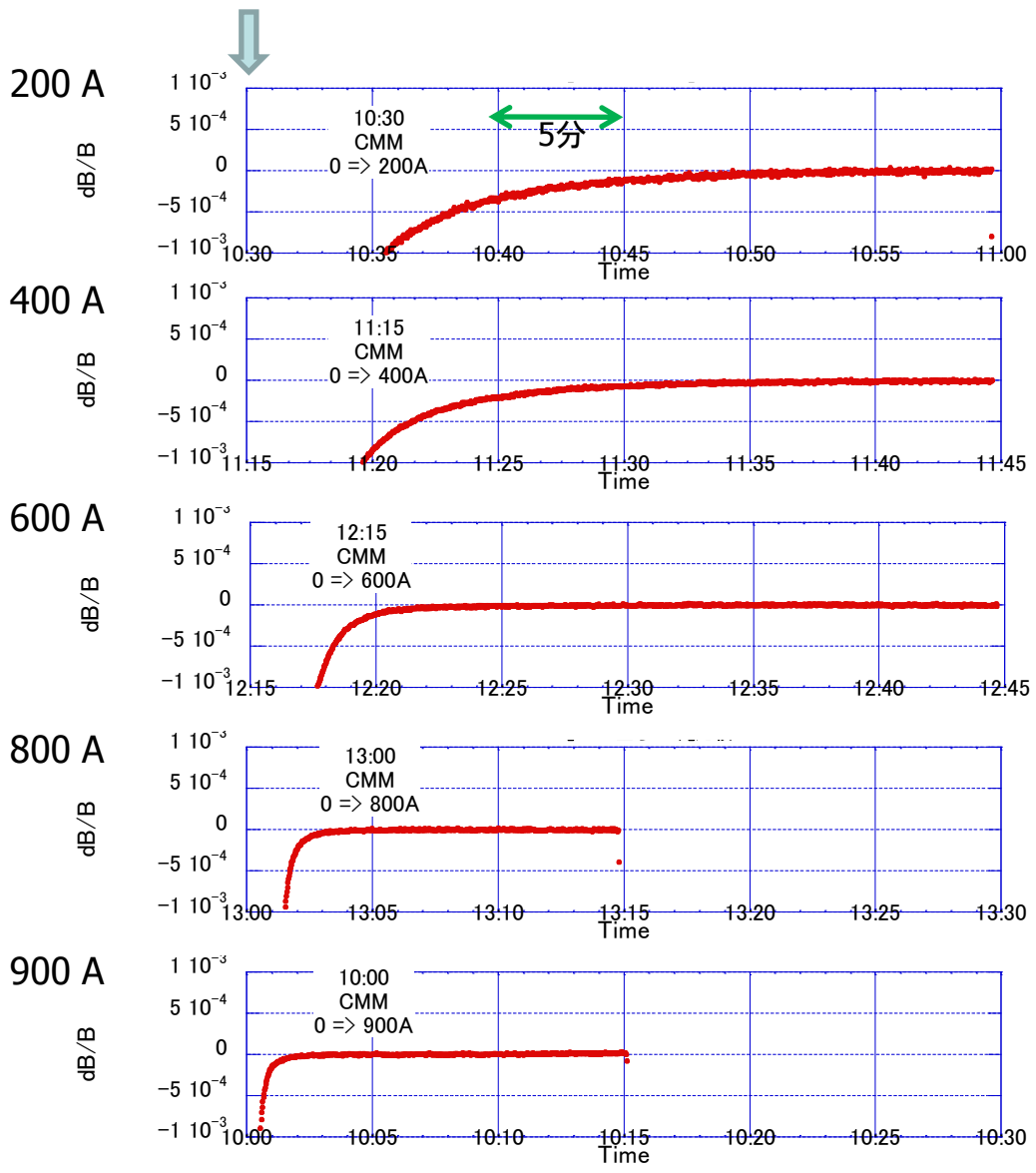


320MeV - C

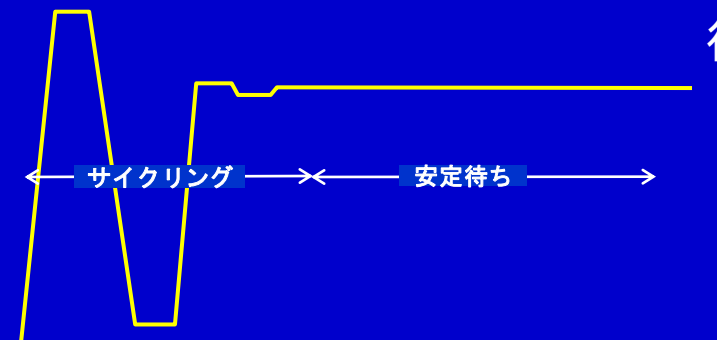


3. サイクロトロン磁場の短時間設定技術

メインコイル電流を設定



ー サイクリングパターンの探索 ー



従来サイクリングパターン

- ・ $\Delta B/B < 10^{-5}$ となる時間 (895A) = 1分 (励磁開始から29分)
- 低磁場 : 11分 (39分)



直接立上げパターン (高磁場用)

- ・ $\Delta B/B < 10^{-5}$ となる時間 (895A) = 2分 (励磁開始から3分)
- ・ 108MeV-Heビーム強度は従来サイクリングの約70% (磁場再現性 $\sim 10^{-5}$)



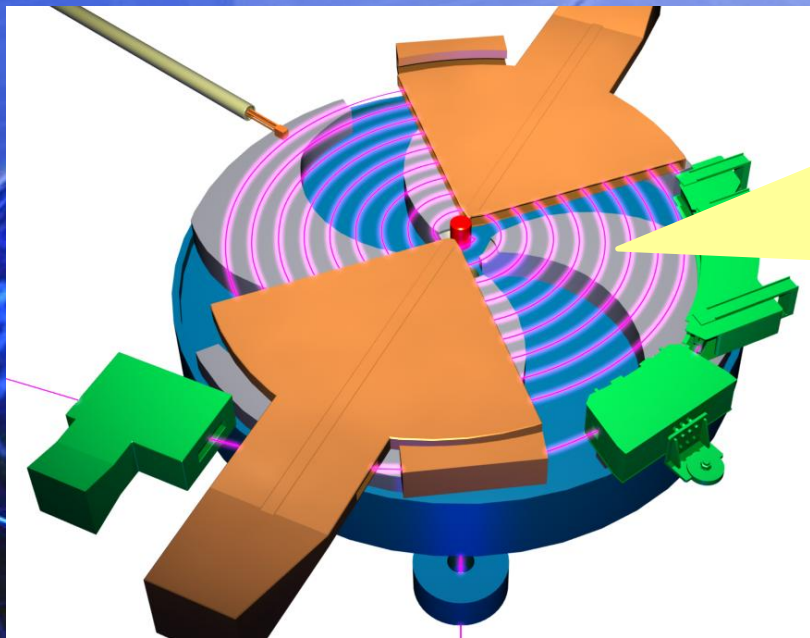
減衰パターン (低磁場用)

- ・ $\Delta B/B < 10^{-5}$ となる時間 (176A) = 5分 (励磁開始から10分)
- ・ 10MeV-Hビーム加速では磁場調整が必要 (磁場再現性 $\sim 10^{-4}$)

3次元磁場・熱・構造解析

H20年度の目標

●サイクロトロン磁場の高精度計測のための3次元磁場解析技術の開発



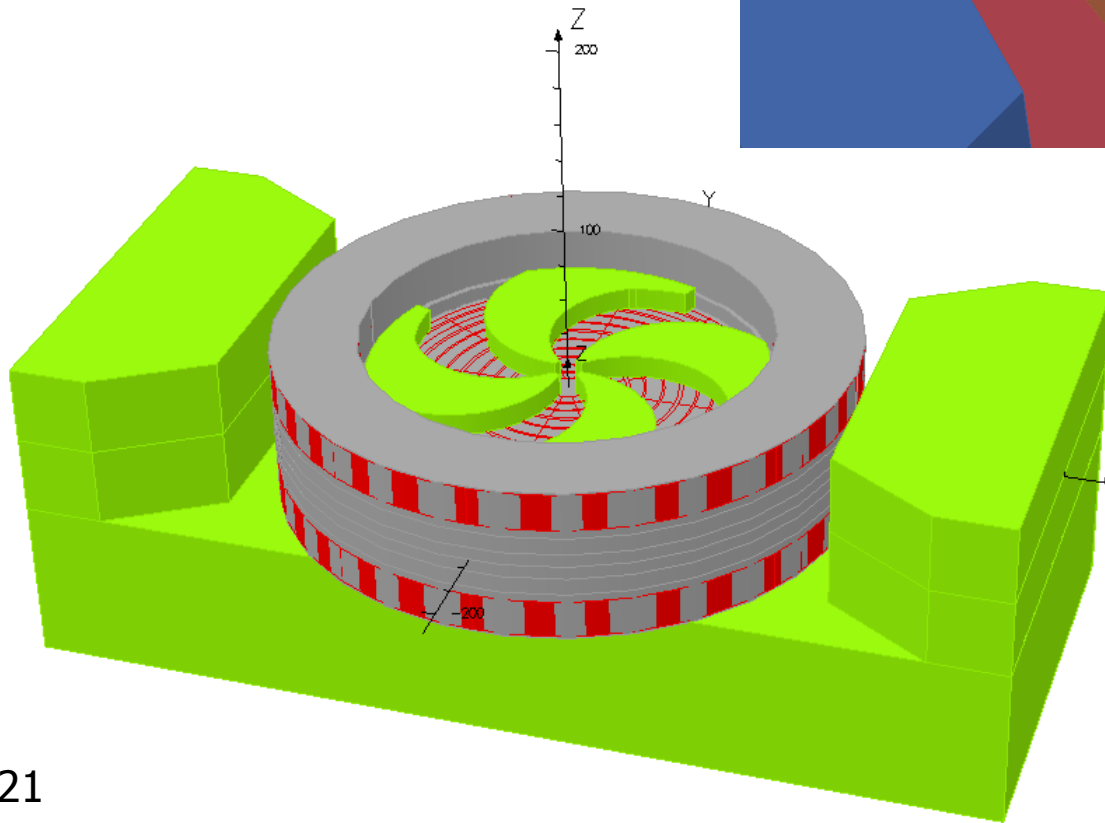
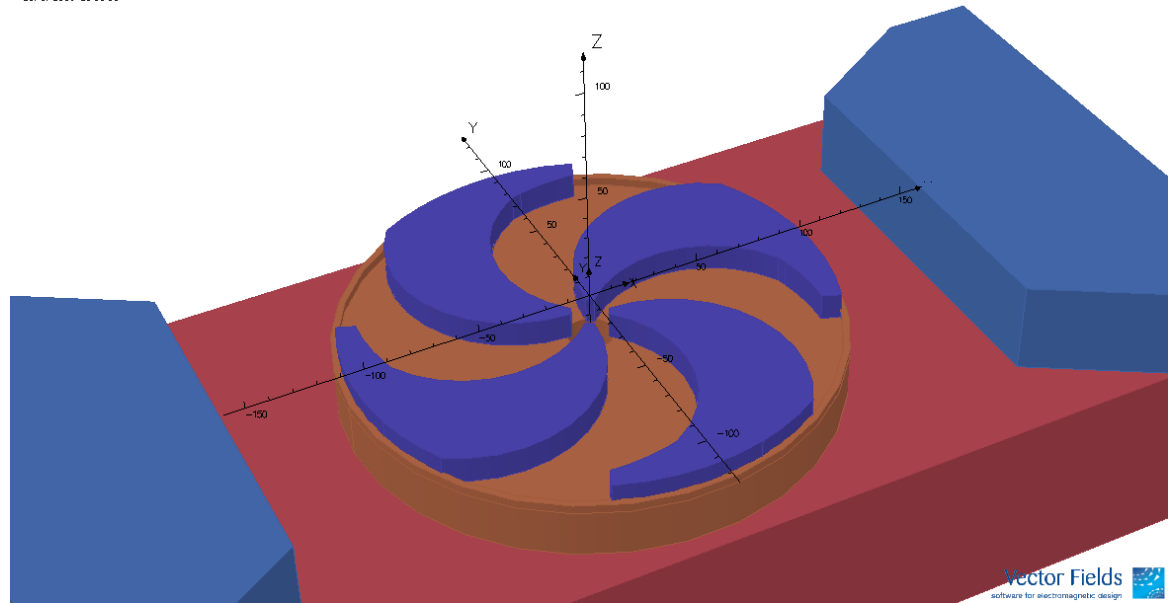
- ・ 磁極に近い領域での磁場分布の均一性評価とNMRプローブによる磁場測定に必要な磁場領域の探索
- ・ トリムコイル磁場及びスパイラルセクター磁場による磁場勾配を踏まえたNMRプローブ計測用磁場補正コイルの必要性和最適計測位置等の検討

電磁石のモデル化とメッシュサイズ

23/6/2009 23:08:35

●メッシュサイズ

- ・上・下・側ヨーク: 5cm
- ・ポール: 5cm
- ・スパイラルセクター: 2cm
- ・メインコイル部のAir: 5cm
- ・トリムコイル部のAir: 2cm
- ・ヒル&バレーギャップAir: 2cm



●Potential & Element Type

- ・上・下・側ヨーク: Total / Linear
- ・ポール: Total / Linear
- ・スパイラルセクター: Total / Linear
- ・メインコイル部のAir: Reduced / Linear
- ・トリムコイル部のAir: Reduced / Quadratic
- ・ヒル&バレーギャップAir: Reduced / Quadratic

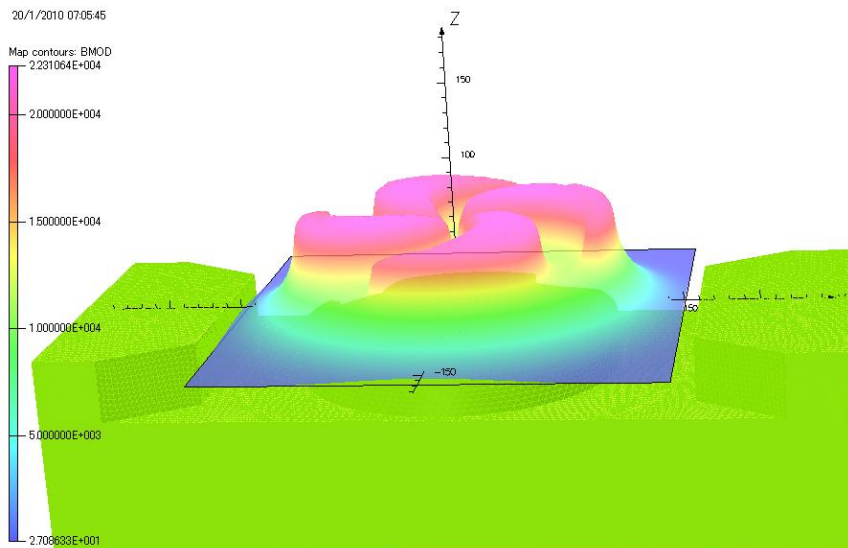
方位角方向の磁場分布の比較

AVF (Azimuthally Varying Field)

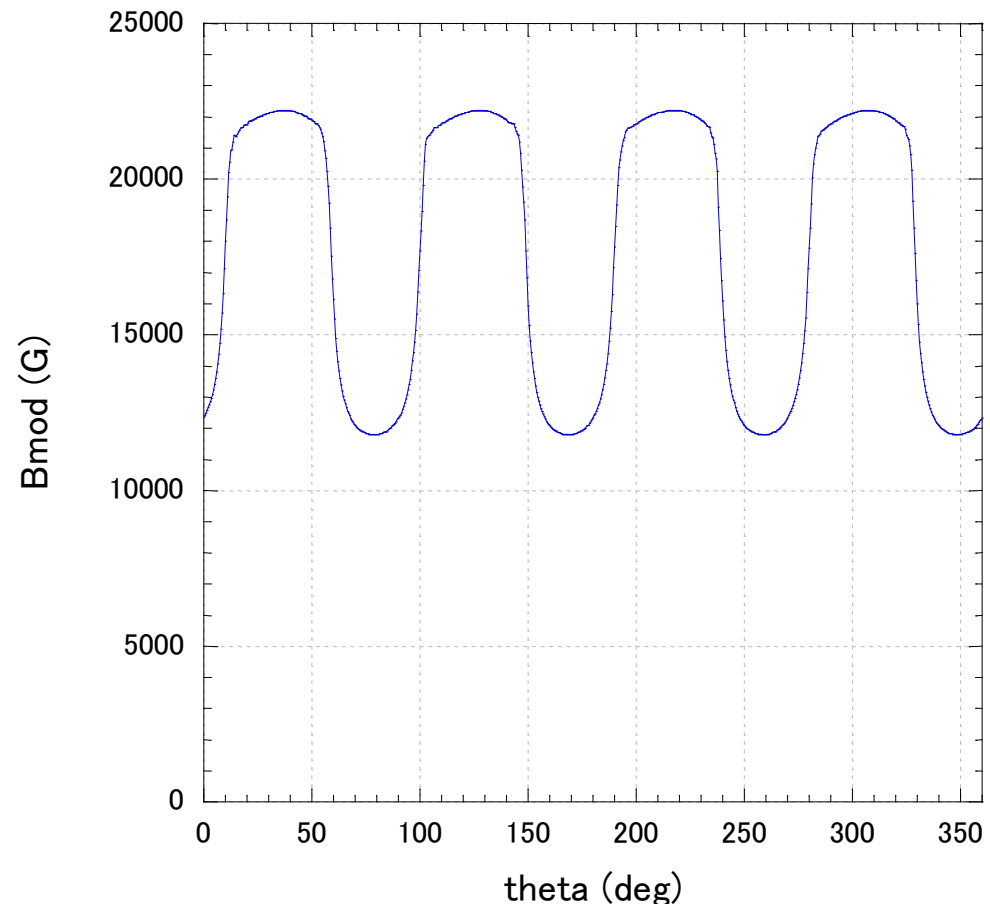
$$B(r, \theta) = B_0(r) + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n(r) \sin n\theta + B_n(r) \cos n\theta)$$

【特徴】

- ・4回対称
- ・スパイラル・セクター
もしくはバレーの中心
線付近が均一



260 MeV $^{20}\text{Ne}^{7+}$
Bmod(θ) at R = 70 cm and Z = -6.25 cm

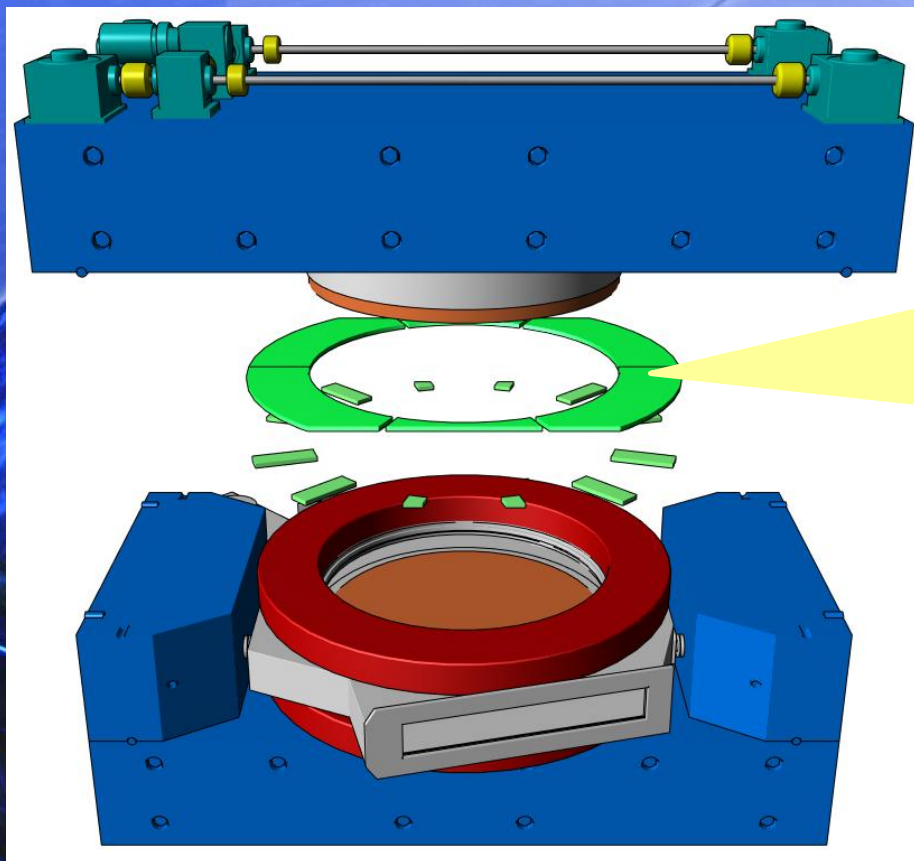


H20年度の成果のまとめ

- NMRプローブの設置に最適な $\Delta B/B \sim 1/10,000$ 程度の磁場均一性が得られる領域は、方位角方向にはスパイラル・セクター磁極の中心線付近に位置し、半径が大きくなるに従ってその均一な平坦な領域は拡大することを確認
- 半径方向の磁場分布は、加速に必要な等時性磁場の形成に依存し磁場勾配を持つものの、比較的磁場勾配の小さな領域は $R=650 \sim 800\text{mm}$
 - 原子力機構が実施したNMRプローブの計測可能置の探索結果と矛盾しない
- 高精度磁場測定を実現するために必要とされる磁場補正コイルの磁場補正量は、50G以上

H21年度の目標

●ビーム切替時の磁場の高安定化と再現性向上のための迅速励磁・制御法の開発

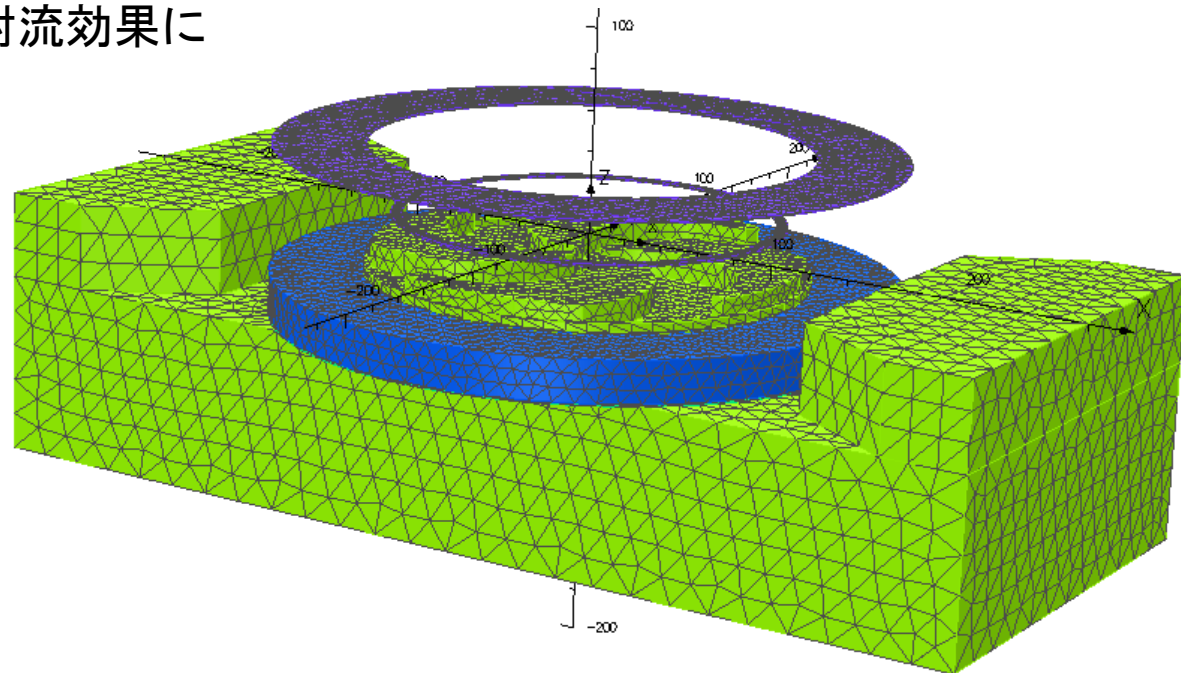


- ・ 主コイル及びトリムコイルからの熱伝導による磁極・鉄心構造の非線形的な変化等を解析
- ・ 短時間で磁場を安定化させ、磁場分布の再現性を高めるための電磁石励磁法や磁極・鉄心温度制御法などを検討

Opera-3D/TEMPO による熱伝導・温度分布解析

●計算条件

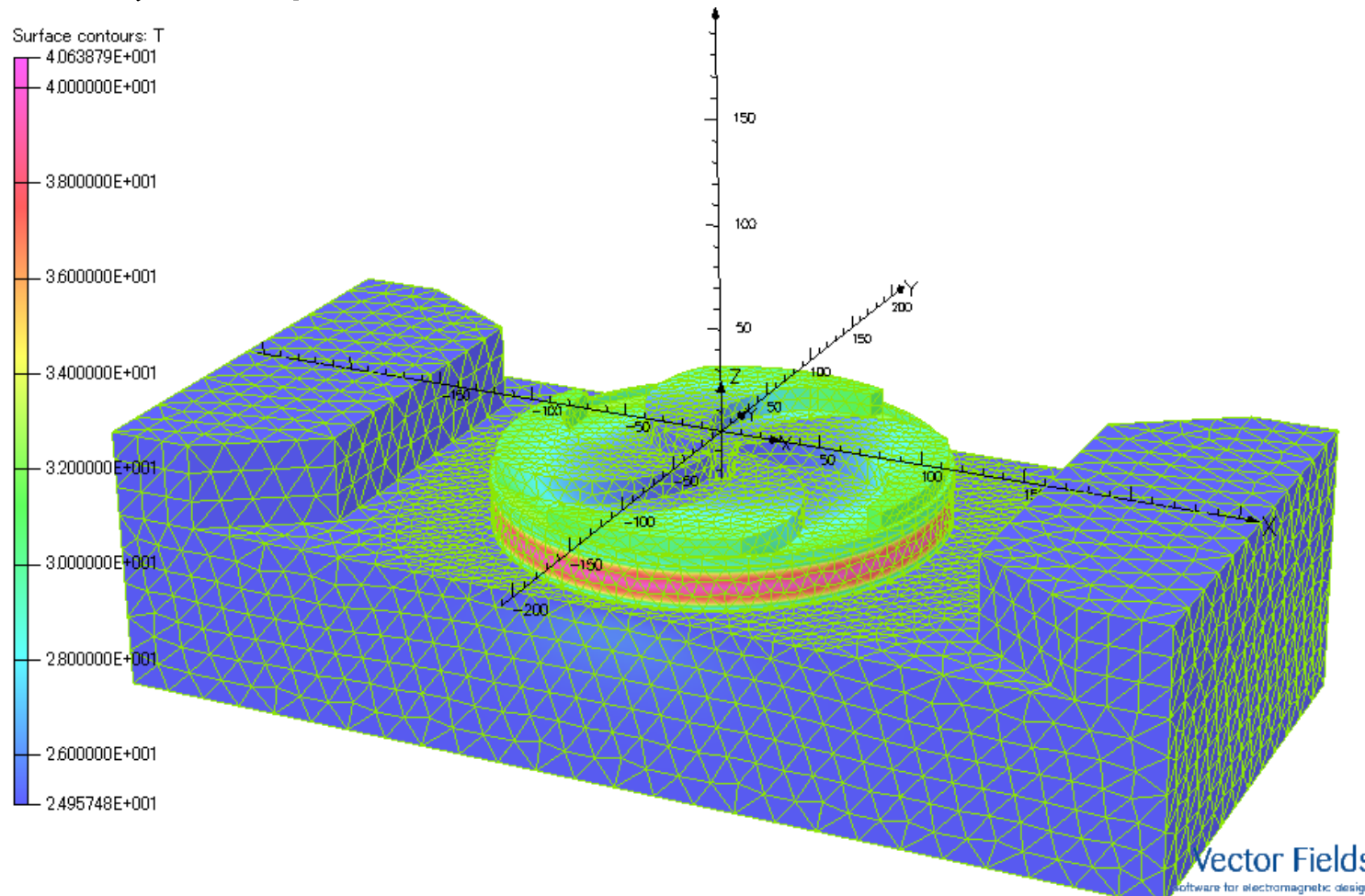
- ・JAEA AVFサイクロトロンで実施した安定化対策に基づき、メインコイル及びトリムコイルからの熱伝導による磁極・鉄心温度変化を計算
- ・熱源は、メインコイルとトリムコイルC11とし、単位体積当たりの発熱量をパラメータとして設定
- ・メインコイル(銅製)
 - 定温板(銅製の水冷ジャケット、厚さ8mm)との間隔は2mm
 - 定温板は上下ヨーク面に直接接触
 - 磁極側面とメインコイル内側面の間隔は10.5mm
 - 計算コードで扱えるのは対流効果のみ
 - 輻射熱による伝熱量は対流効果に上乗せして模擬
 - 銅表面から空気への熱伝達率を使用
(ただし設定値は可変)
- ・トリムコイルC11(銅製)
 - セクター磁極との間隔は1mm
 - 設定パラメータはメインコイルと同様



磁極・鉄心の温度分布

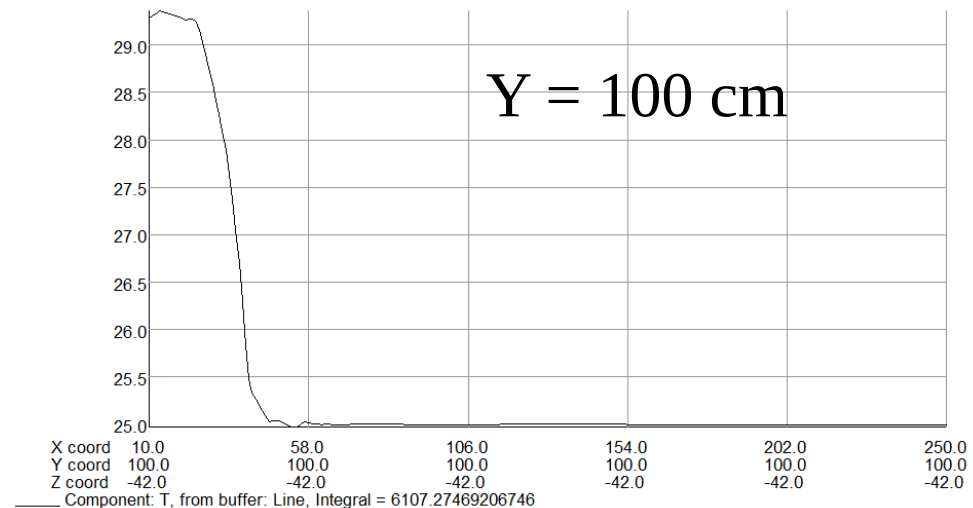
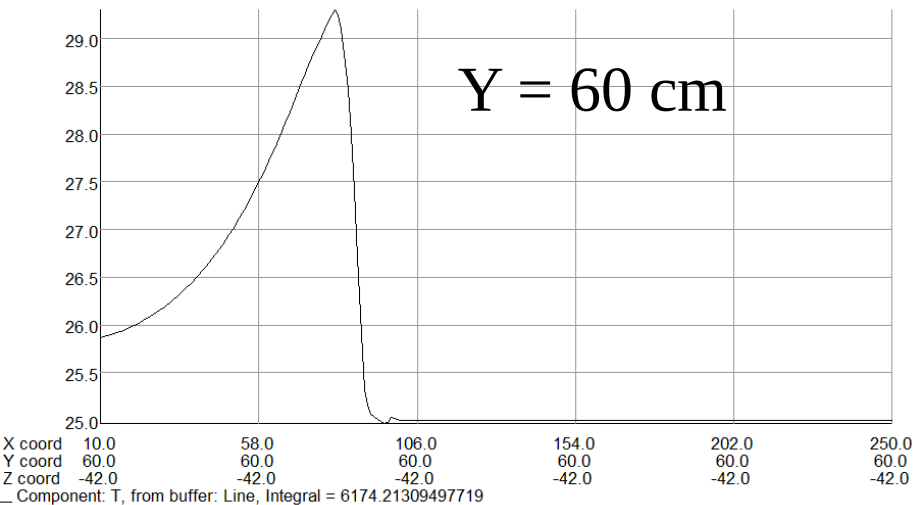
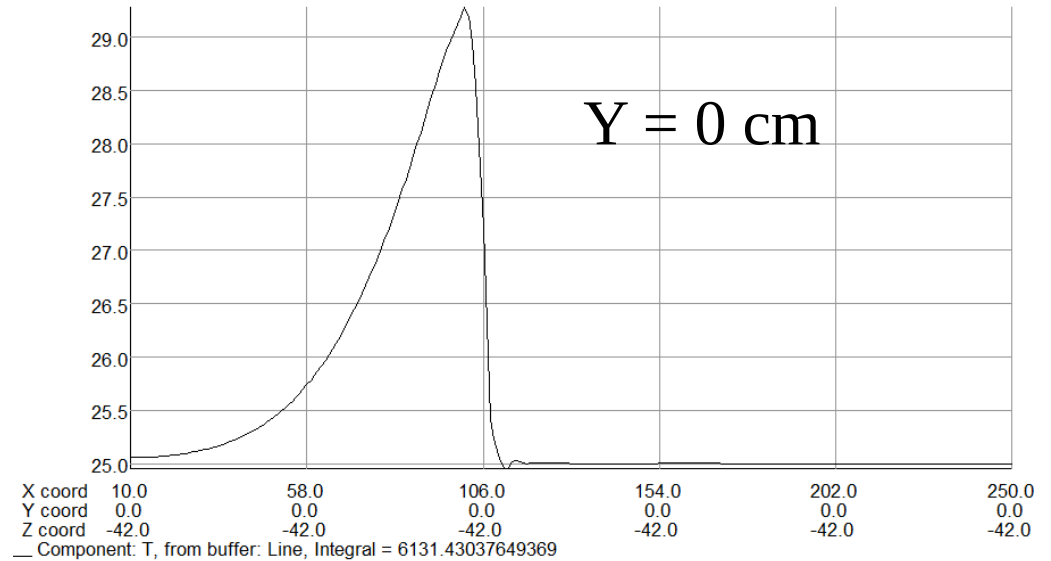
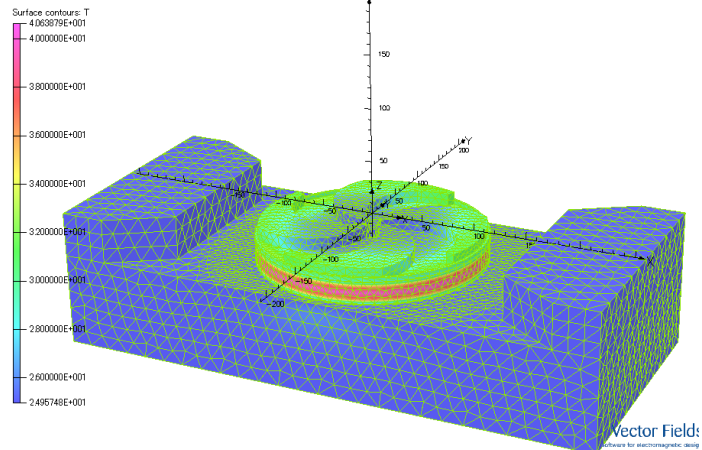
発熱量

- ・メインコイル 10W/m³
- ・トリムコイルC11 5W/m³

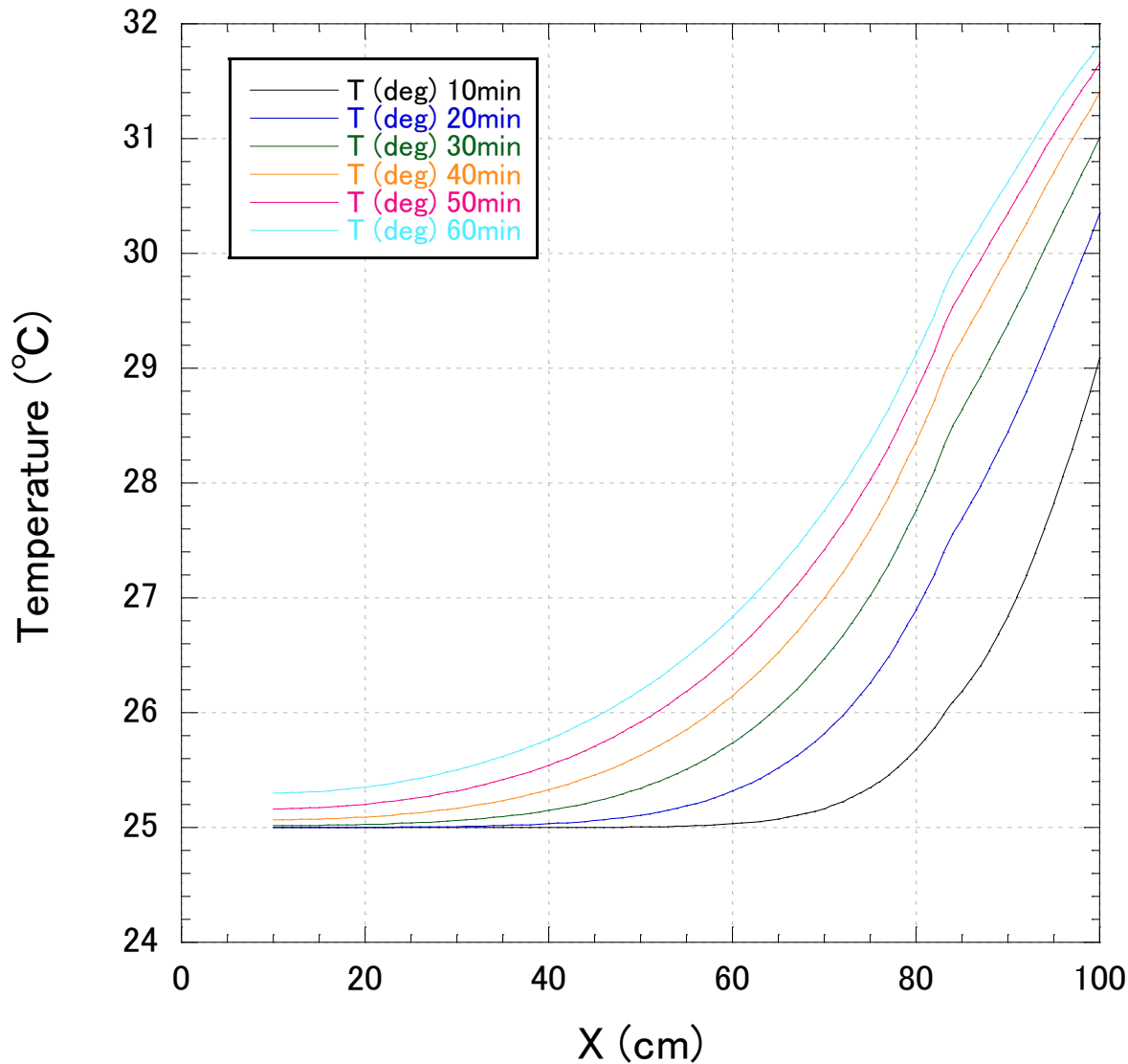


下ヨーク上面での温度分布

$Z = -42 \text{ cm}$



磁極温度の時間変化



発熱量

- ・メインコイル

10W/m³

- ・トリムコイルC11

5W/m³

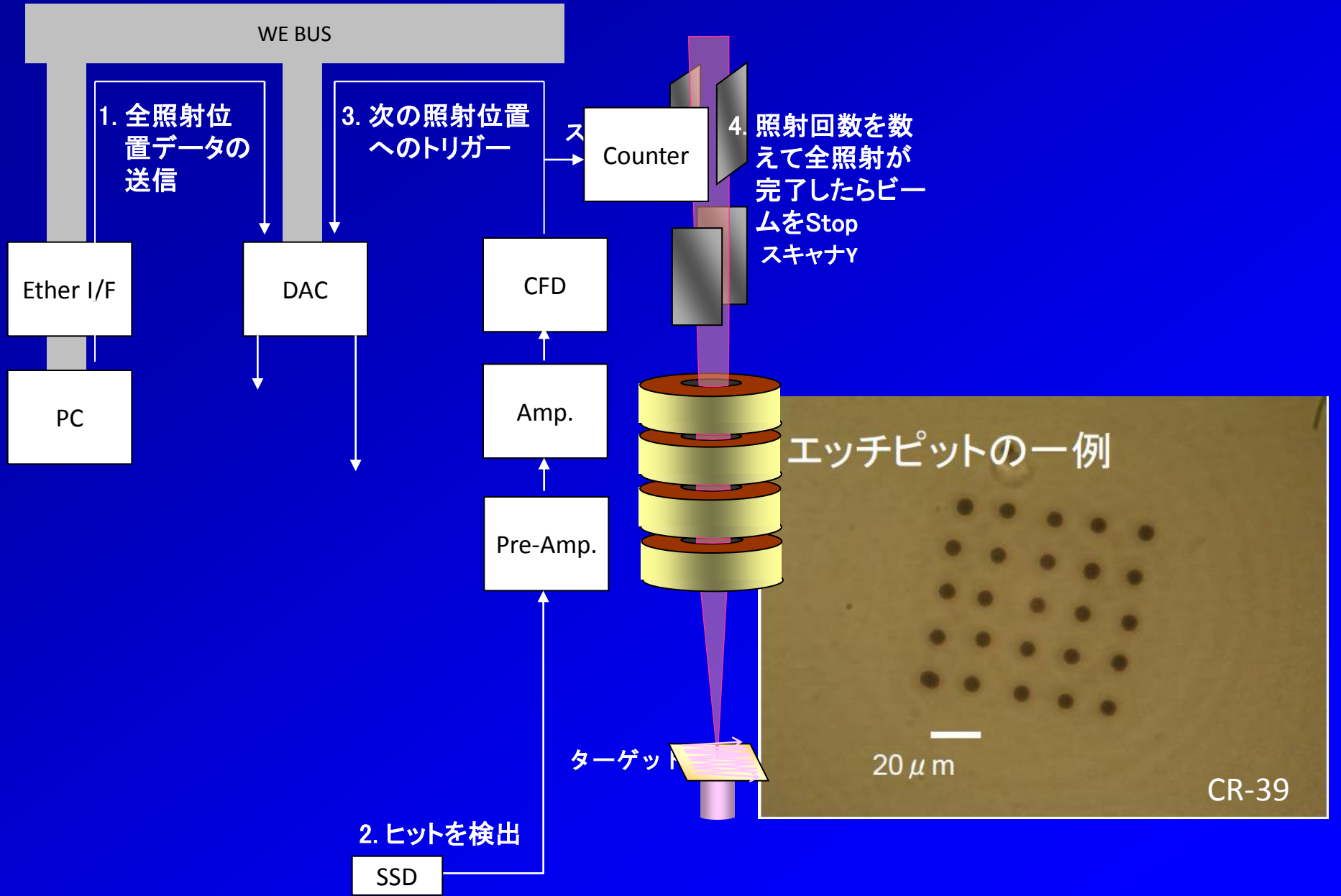
Y = 0 cm

Z = -20.5 cm

シングルイオンヒット技術

4. シングライオンヒット技術

予め決められた位置にシングライオンヒットさせるシステムを構築



4. シングリオンヒット技術

シングリオンヒット位置のリアルタイム検出技術

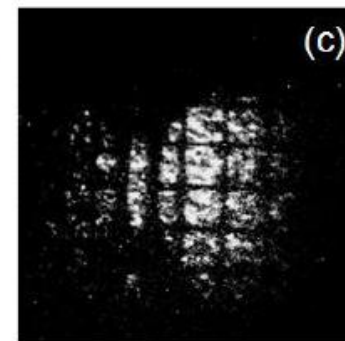
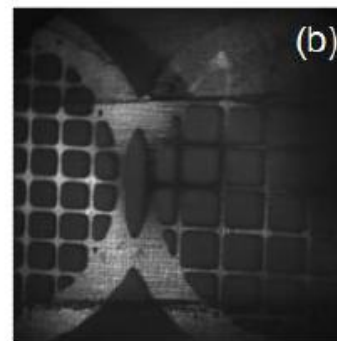
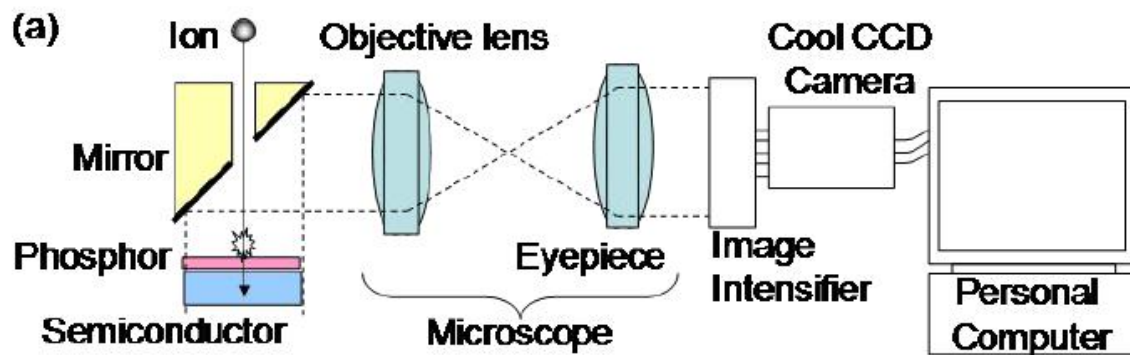
^{241}Am からの α 線を用いたオフライン実験を実施

実験装置の構成

- ・シンチレータ: ZnS(Ag)
- ・イメージインテンシファイア: 浜松ホトニクス C8600-03
- ・冷却CCDカメラ: 浜松ホトニクス C4480

結果

- ・ α 線源からの5.5MeVの α によるスポットを確認
- ・シンチレータの前に設置したCuメッシュの明瞭な影を観察(下図 b、c)



シングルイオンヒット技術

The Finest “Beam”: Atom

~~Focusing!~~

“ATOM”

Atomos: ATOMOS

INDIVISIBLE

The Finest “Beam”: Atom

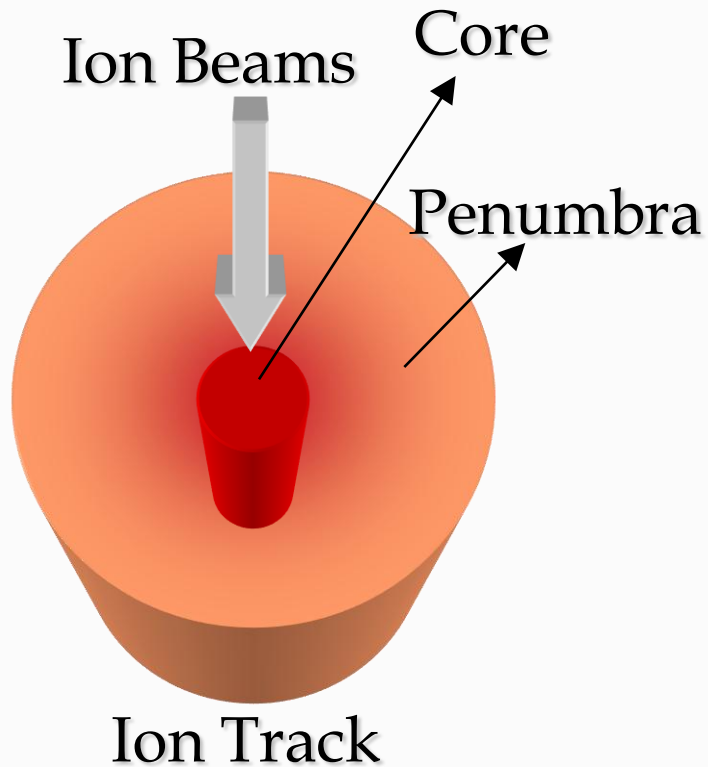
Fabrication by Single Particle

◀ Possible or Impossible ?

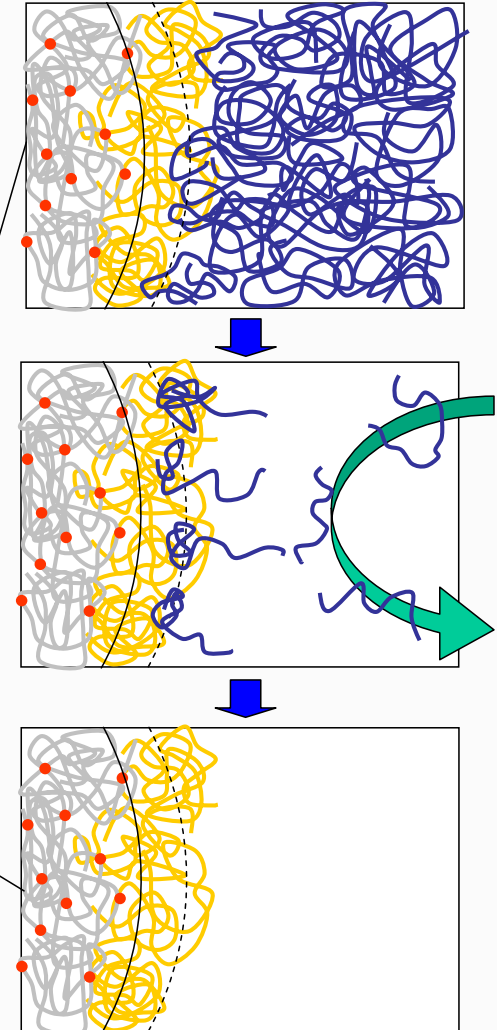
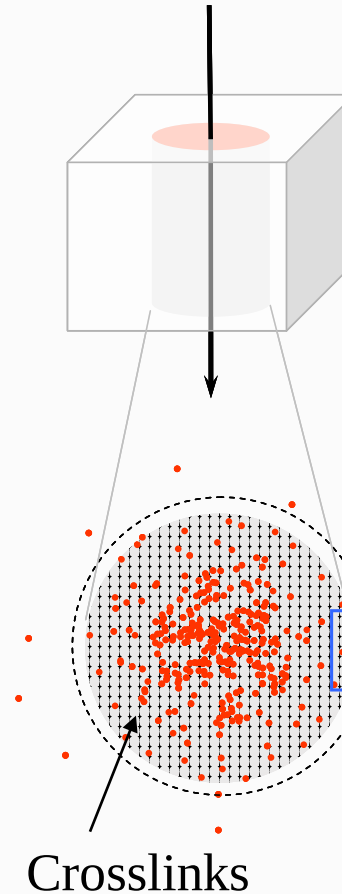
How to Prepare Nanowires

Ion Beams

Ultra-high LET (Linear Energy Transfer) Beam



Particle



Shape of Macromolecules

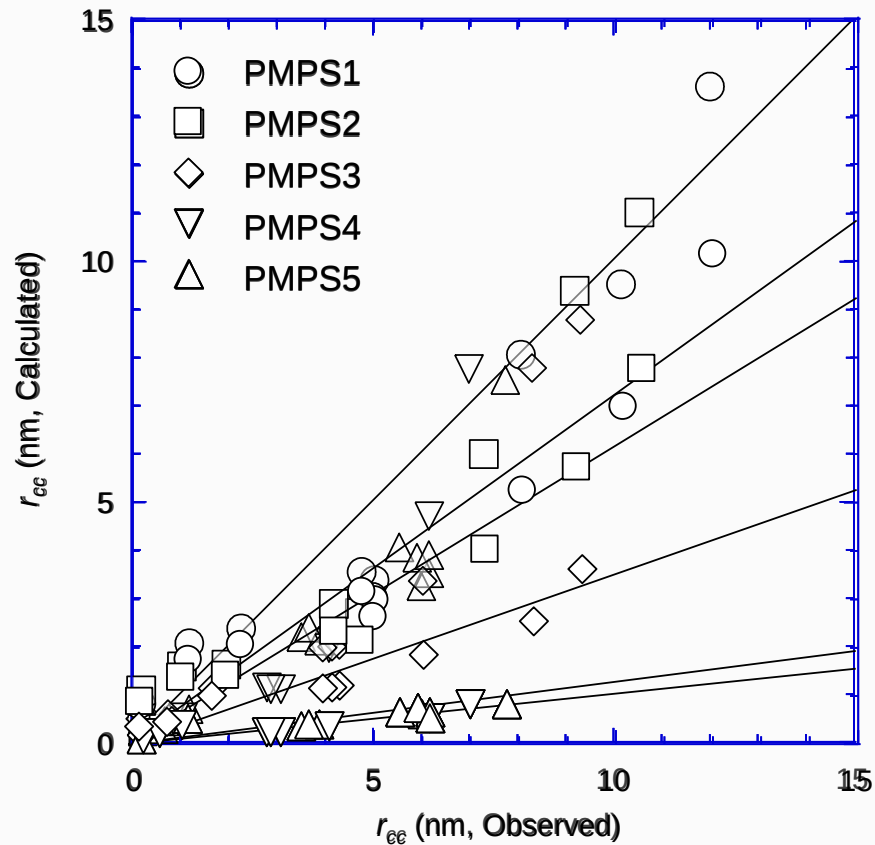
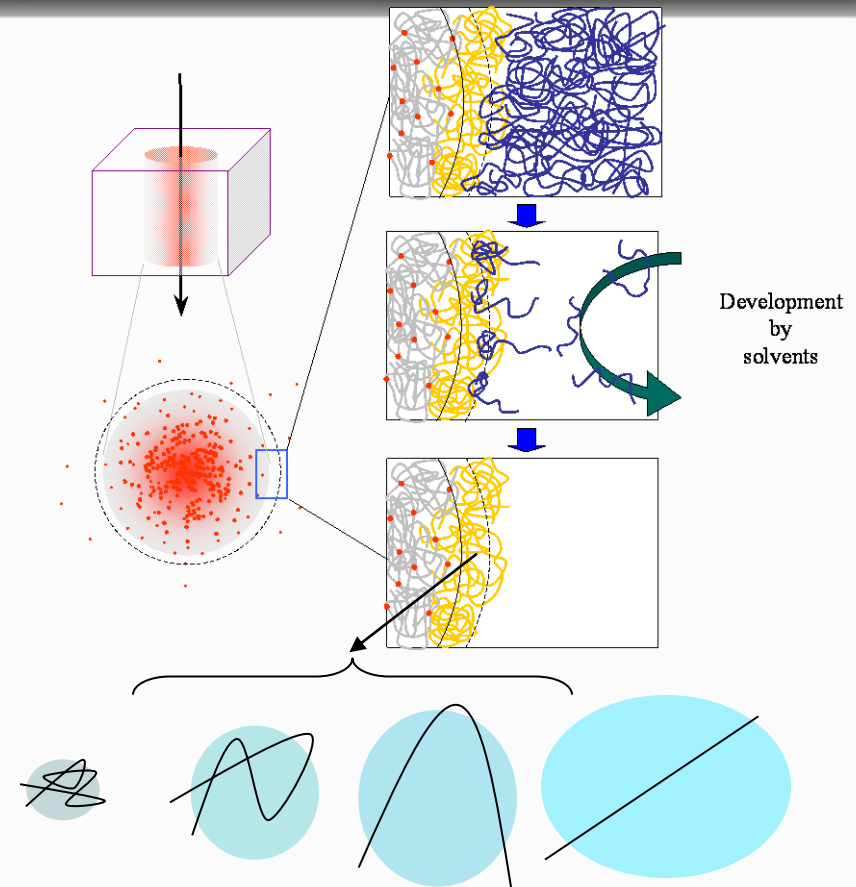


Figure. Correlation between r_{cc} values estimated experimentally and those calculated using the eq.



Shape of Macromolecules

$$r'^2 = \frac{LET \cdot G(x) N^3 k}{400 \pi \rho A} \left[\ln \left(\frac{e^{1/2} r_p}{r_c} \right) \right]^{-11}$$

Photoresist Polymer SU-8

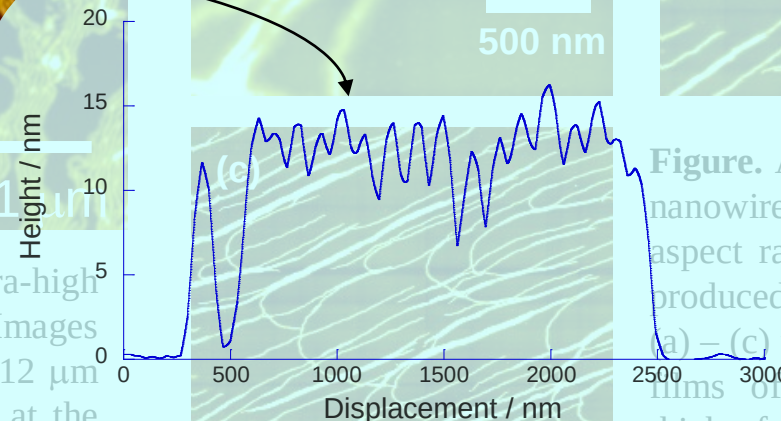
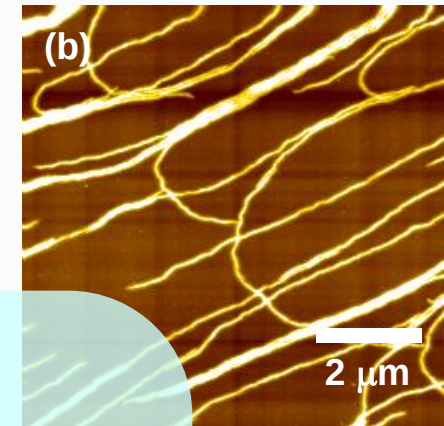
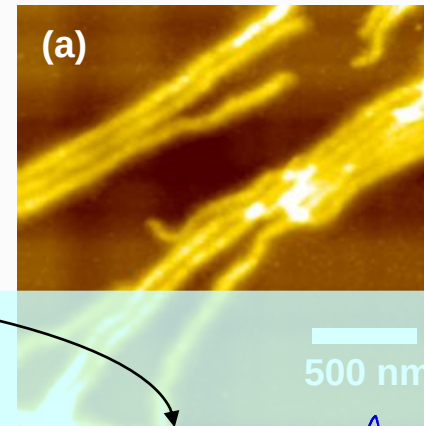
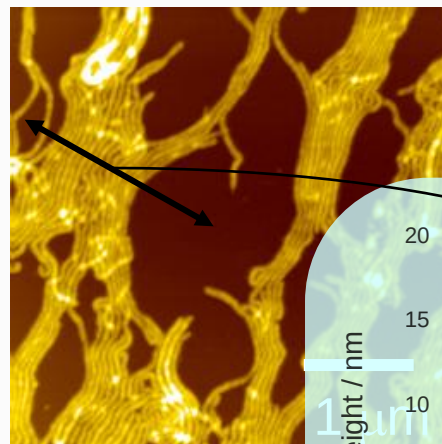
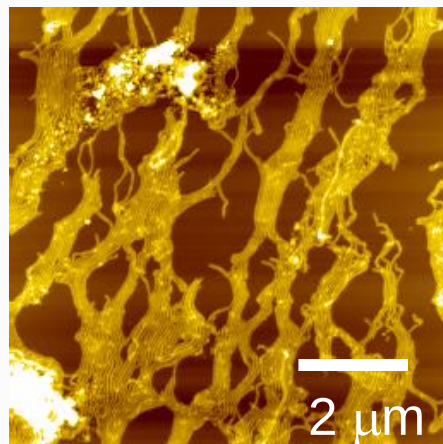
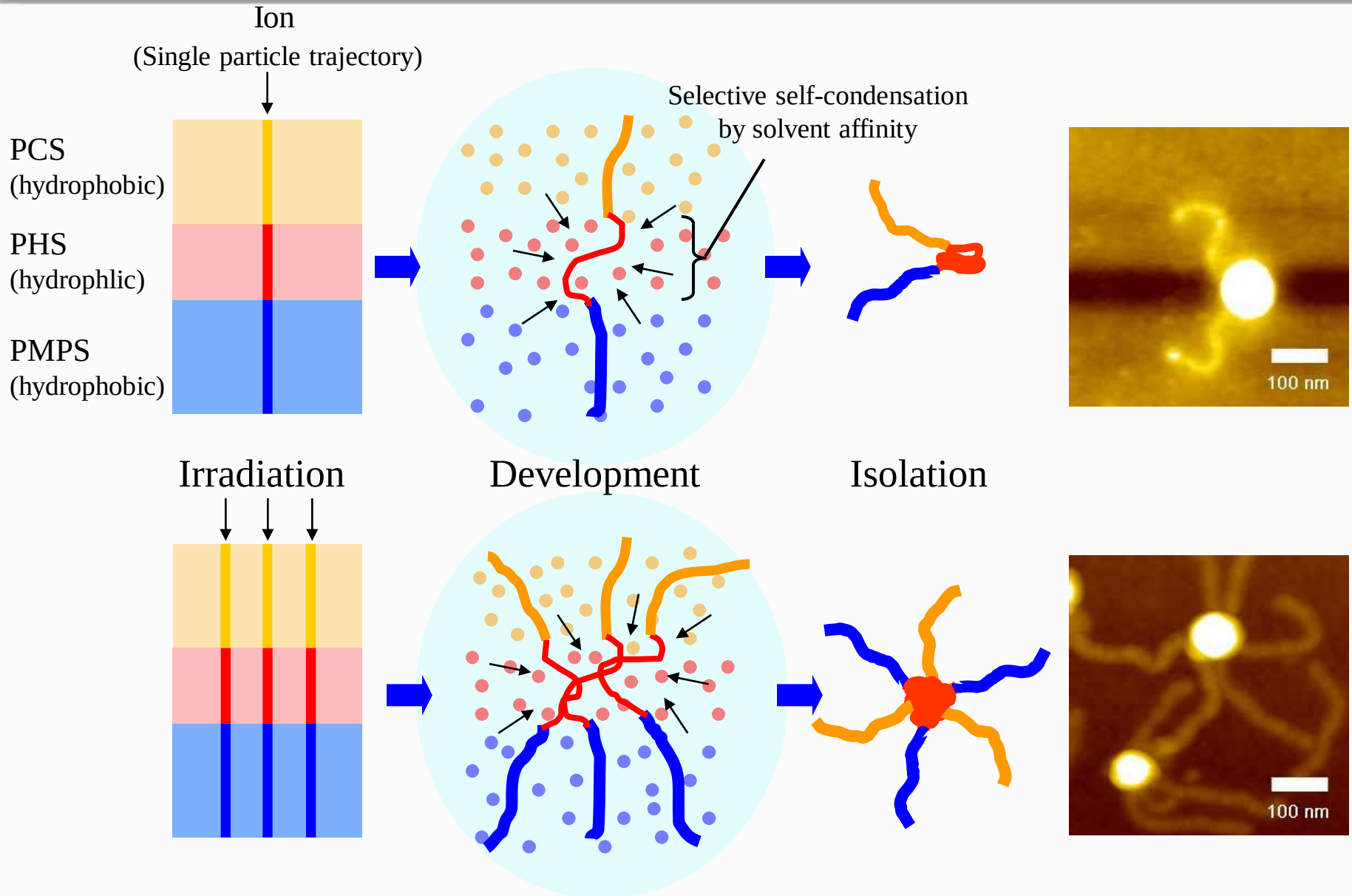


Fig. AFM micrographs of nanowires with ultra-high aspect ratio based on SU-8 produced by SPNT. Images (a) – (c) were observed in the films of SU-8 at $\sim 12 \mu\text{m}$ thick after irradiation of 400 MeV Ar ion beam at the fluence of $1.0 \times 10^8 \text{ ions cm}^{-2}$. Development was carried out in diacetonealcohol for 10 min.

Fig. Cross-sectional profiles of the nanowires on Si substrate based on SU-8 produced by SPNT. The profile was measured at the position indicated by an arrow in the corresponding micrograph.

Aspect Ratio = 800

Formation Process



今後の展望

技術開発

ビーム条件切換
短時間化・M/Q
分解能の向上

サイクロトロン本体
の迅速な磁場形成
や等時性磁場形成、
ビーム位相制御等
の技術開発

M/Q $\approx$ 2のカクテルビー
ム実現。異なるM/Qイ
オン種における切替時
間20分以内

材料・バイオ研究開
発から求められる
様々なイオンの迅速
な切替えと安定な
ビームの供給

シングルイオン
ヒット技術の高
度化

大気中におかれた
ターゲットの狙った
位置に高精度
(1 μ m)自動照準し
照射する技術

・1mm $\times$ 1mmの範囲に
1 μ m程度のヒット位置精度
・毎分600以上高速ヒット
・シングルイオンヒット位置
リアルタイム計測

研究利用の為の照射
システム構築

利用研究の展開

半導体耐放射線 性評価技術

飛程100 μ m程度の
各種高エネルギー
重イオンによるパ
ワーデバイスのシン
グルイベント効果を
評価

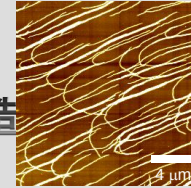
銀河宇宙線による
パワーデバイスの
破局故障確立が評
価できることを実証

・大規模宇宙機シス
テムの信頼性向上
・地上用パワーデバ
イスの中性子による
破壊現象回避

イオンビームナノ 加工

高エネルギーイオン
飛跡を使ったナノサ
イズの物創り技術
の開発

ナノファイバー
超高アス
ペクト比
3次元構造



1次元半導体
超高効率触媒
超高感度センサ
DDS
人工臓器

マイクロビーム生 物効果解析

生体の標的部位に
異なる線質のシン
グルイオンを照射し、
放射線応答のダイ
ナミクスを解析

細胞集団全体として
の放射線応答のダ
イナミクスを明らか
にする

・低線量・低線量率
放射線リスク評価
・重粒子線治療
・イオンビーム育種