

# RCNP AVFサイクロトロン施設 アップグレードの現状

神田浩樹

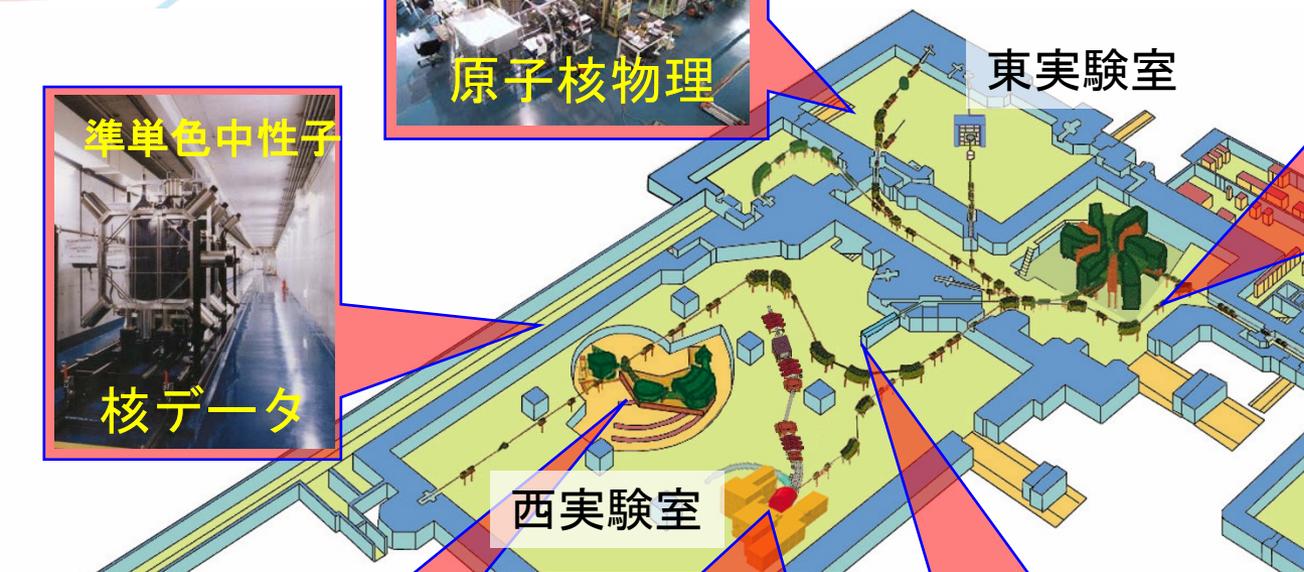
(大阪大学 核物理研究センター)

福田光宏、畑中吉治、森信俊平、齋藤高嶺、嶋達志、  
依田哲彦、鈴木智和、友野大、中尾政夫、阿野真治、  
安田裕介、永山啓一、鎌倉恵太、原周平、  
Koay Hui Wen、森田泰之、武田佳次郎、原隆文

# Contents

- RCNPサイクロトロン施設
- アップグレードの概要
- イオン源の整備
- AVFサイクロトロンの整備
- 施設の機能強化
- ユーザーとの連携
- まとめ

# RCNPサイクロトロン施設



# Present K140 AVF Cyclotron

1973 Completed

Proton 10~80MeV

1991 Mainly used as an injector of the ring cyclotron



# Present K140 AVF Cyclotron

1973 Completed

Proton 10~80MeV

**Magnet** 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



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

# 2017年度から2019年度の 加速器アップグレードの概要

- 加速器停止期間: **2019年1月から約1年間を予定**
    - 2カ月程度のマシンスタディ後に徐々にユーザー利用を開始  
(早ければ2020年3月頃を予定)
  - 目的
    - 施設、装置の老朽化部の更新による  
**安定なビーム供給**
    - 加速器システムの「高輝度化」による、  
**高品質ビームの高強度化**
- **核物理、医理連携、産学共創の拠点としての  
RCNPの機能強化**

# 加速器アップグレードの方向性

## “高輝度化”（ビーム強度増強&低エミッタンス化）

※AVFサイクロトロンを重点的にアップグレードし、  
高強度・高品質ビームの供給を目指す

- 二次粒子ビーム供給機能の強化： **陽子ビームの高強度化( $1\mu\text{A} \rightarrow 10\mu\text{A}$ )**
  - ミューオン（MuSIC@WSSコース）
  - 白色中性子（WNコース）
  - 準単色中性子（N0コース）
- 短寿命RI供給機能の強化：  $^4\text{He}$ ビームの高強度化
  - 短寿命RI供給プラットフォーム（科研費研究のサポート）
  - アルファ線内用療法の実用化研究（医理連携事業）
- 超高分解能実験機能の強化： 軽イオンビームの高品質化
  - 高品質・ハローフリービーム（WSコース）
  - 高偏極度ビーム（WSコース、N0コース）
- 重イオンビーム供給機能の強化： 中低エネルギー重イオン
  - 不安定核ビーム（ENコース）
  - C A G R A + Grand-RAIDEN（WSコース）など

# H29年度高輝度量子ビーム供給システム整備

- 引き出し電圧 15kV ⇒ 50kV
- Duoplasmatron追加
- AVF入射まで50kV入射対応化(配置変更)
- 診断機器の追加(エミッタンスモニタ)
- オフラインテストライン

## Duoplasmatron

新規設置

for intense p, He

米国NEC社製 2JA022264

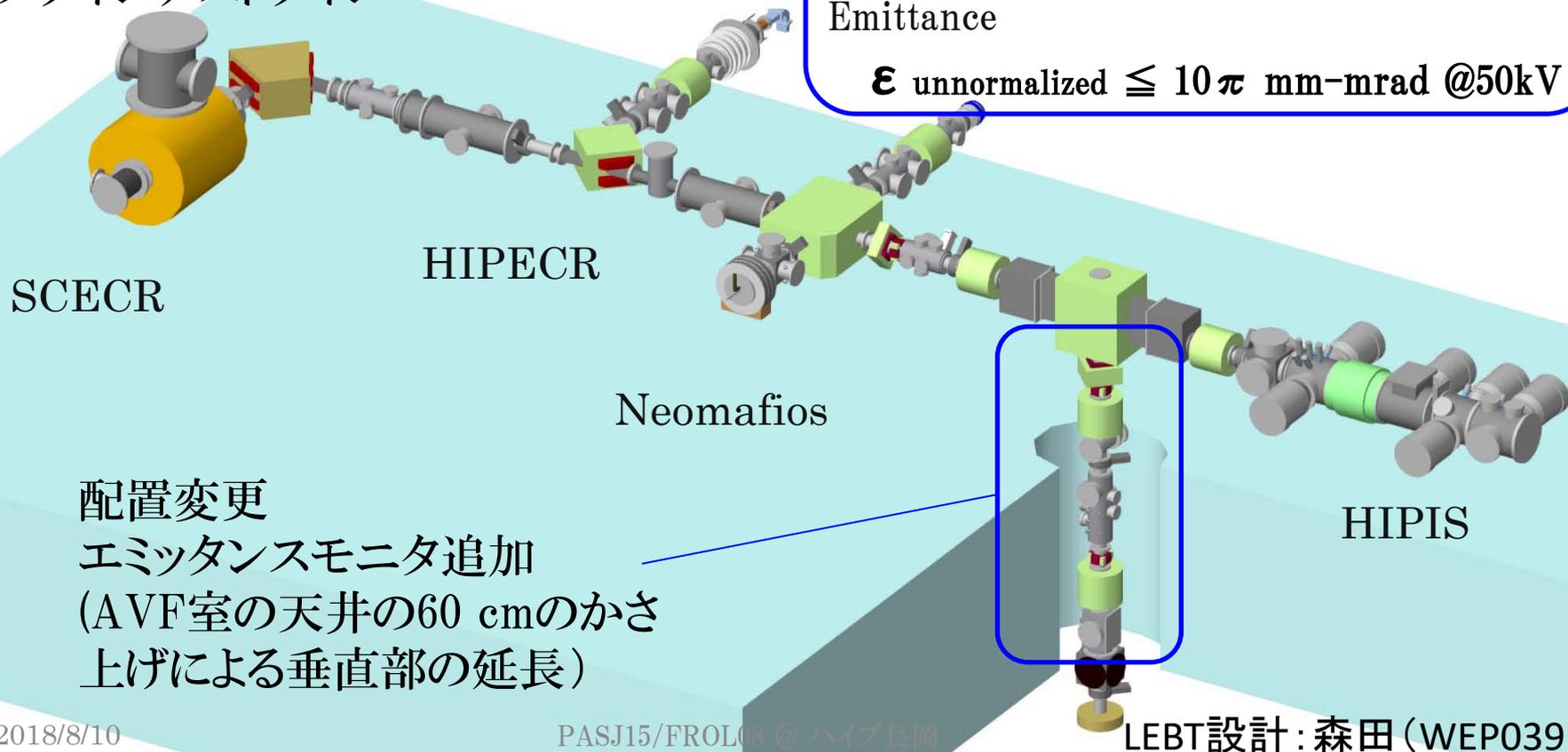
H<sup>+</sup> 10mA at 30kV引出

He<sup>+</sup> 2mA at 30kV引出

⇒ 50 kV に改造

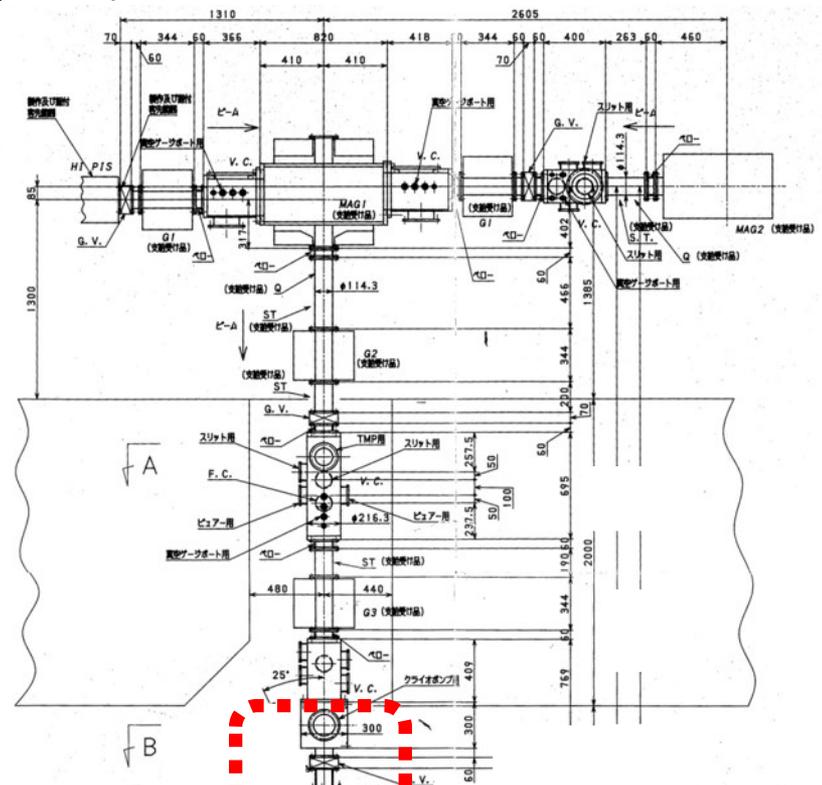
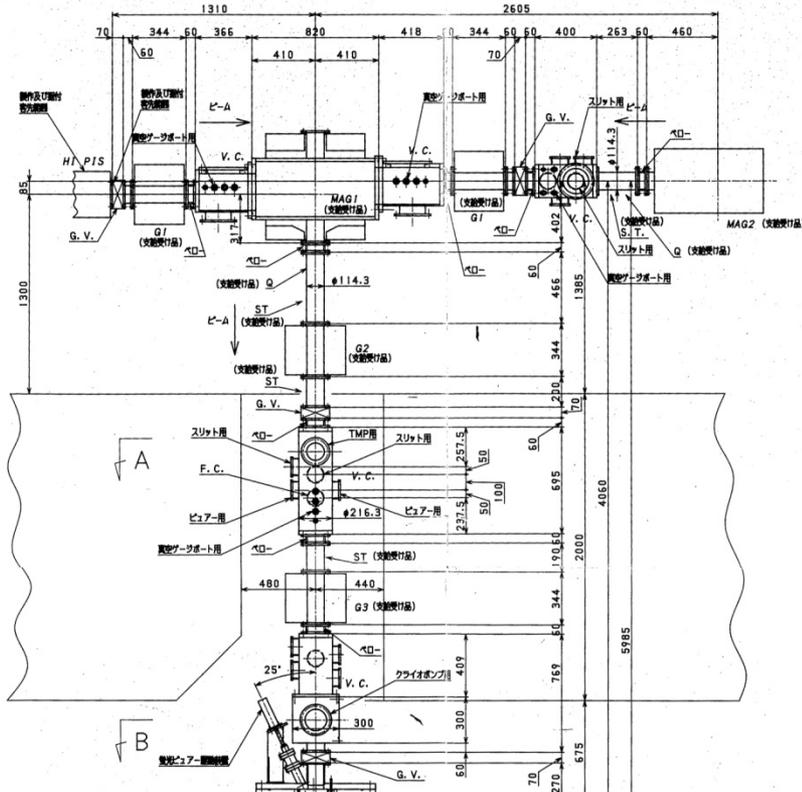
Emittance

$\epsilon$  unnormalized  $\leq 10\pi$  mm-mrad @50kV

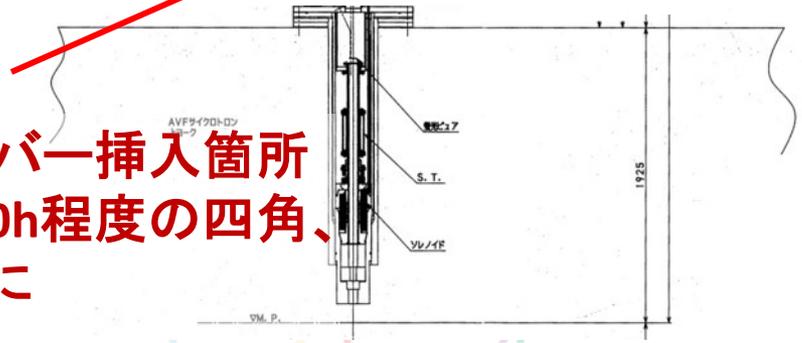


配置変更  
エミッタンスモニタ追加  
(AVF室の天井の60 cmのかさ  
上げによる垂直部の延長)

# 軸入射ラインの配置案

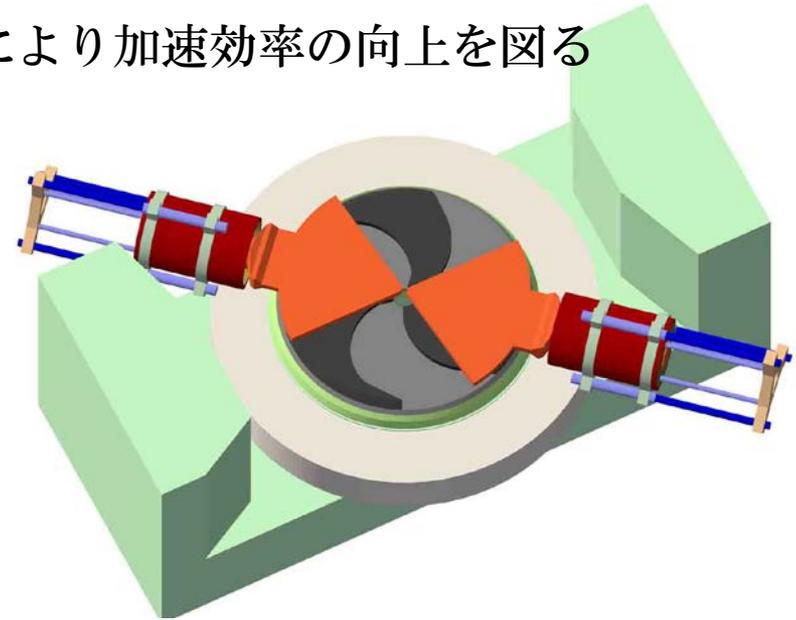
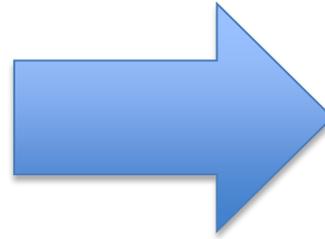
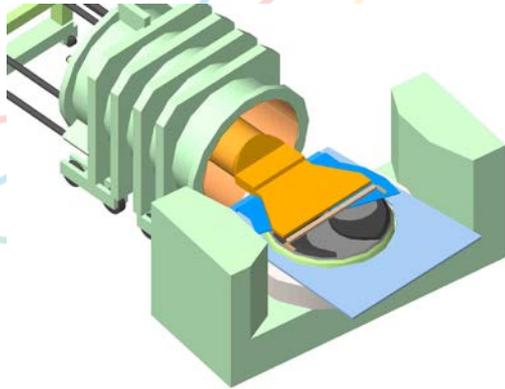


**新規製作の診断機器用チェンバー挿入箇所  
(チェンバー概要: 300x300x600h程度の四角、  
入射軸に平行な4面それぞれに  
JISの250くらいのVGフランジ)**



# AVF Dee/共振器の更新

2Dee化により加速効率の向上を図る



## 共振器ハーモニクスとRF周波数の関係

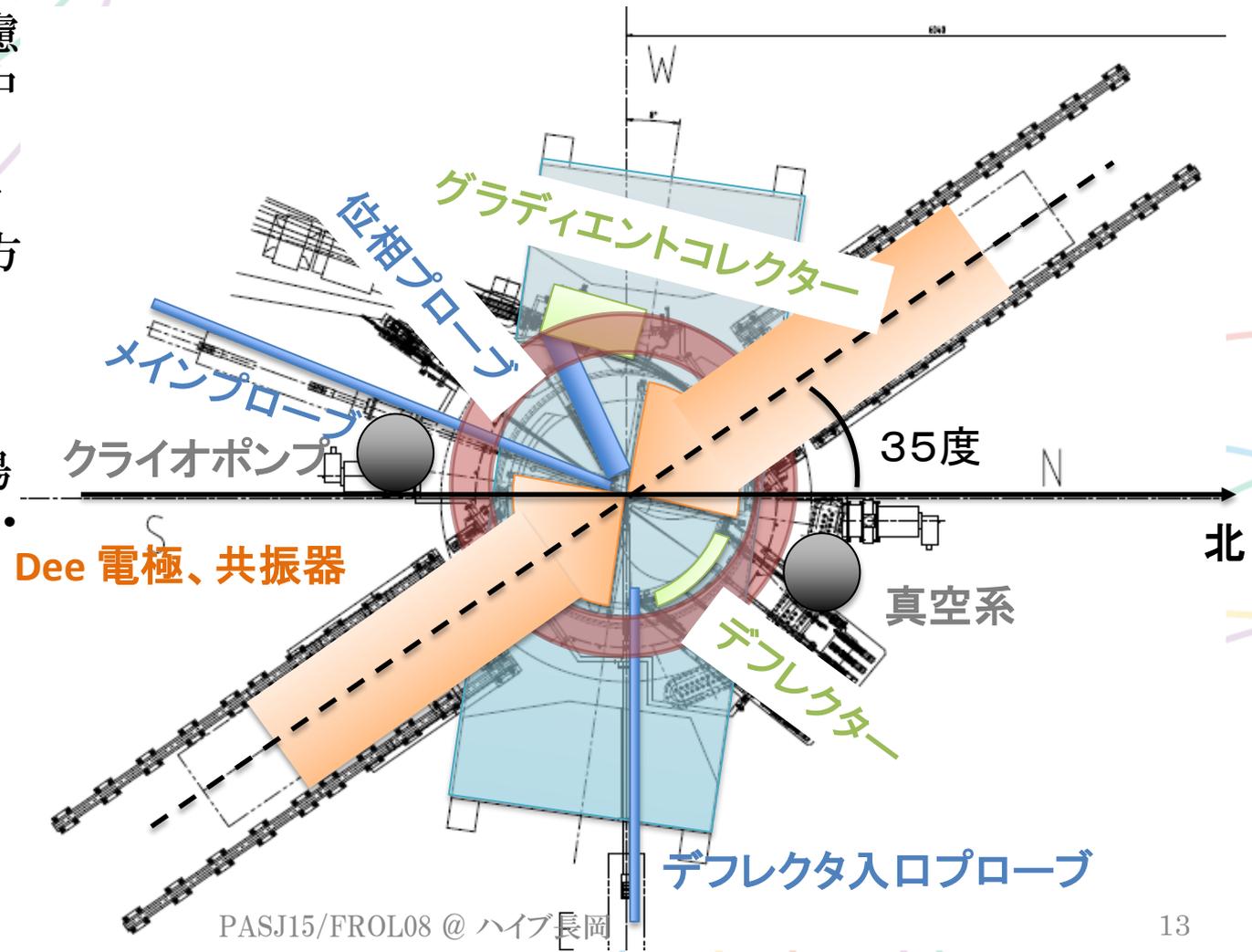
	180deg. Dee	Two 90deg. Dee		
AVF harmonics	h=1	h=1	h=2	h=3
Particle frequency	6.0~17.33 MHz	18.0~37.3 MHz	9.00~18.65 MHz	6.00~12.43 MHz
Ring RF frequency h=6	30~52 MHz	54~60 MHz	30.00~55.95 MHz	30.00~37.3 MHz
Ring RF frequency h=10	30~60.0 MHz		45~60 MHz	30~60 MHz
Energy gain ratio $\Delta E / (QV_{dee})$	2	2.8	4	2.8

目標とする  
周波数レンジ

18~37.3 MHz

# 機器配置案

- 部屋の壁、既設の機器等との干渉を考慮しつつ配置を検討中
- プロブや共振器、デフレクタ等の可動部については駆動方法や支持方法を既設の機器を参考に
- 実際の粒子の加速に必要な電場・磁場を得るようFEM計算・粒子軌道計算にて設計を決定する

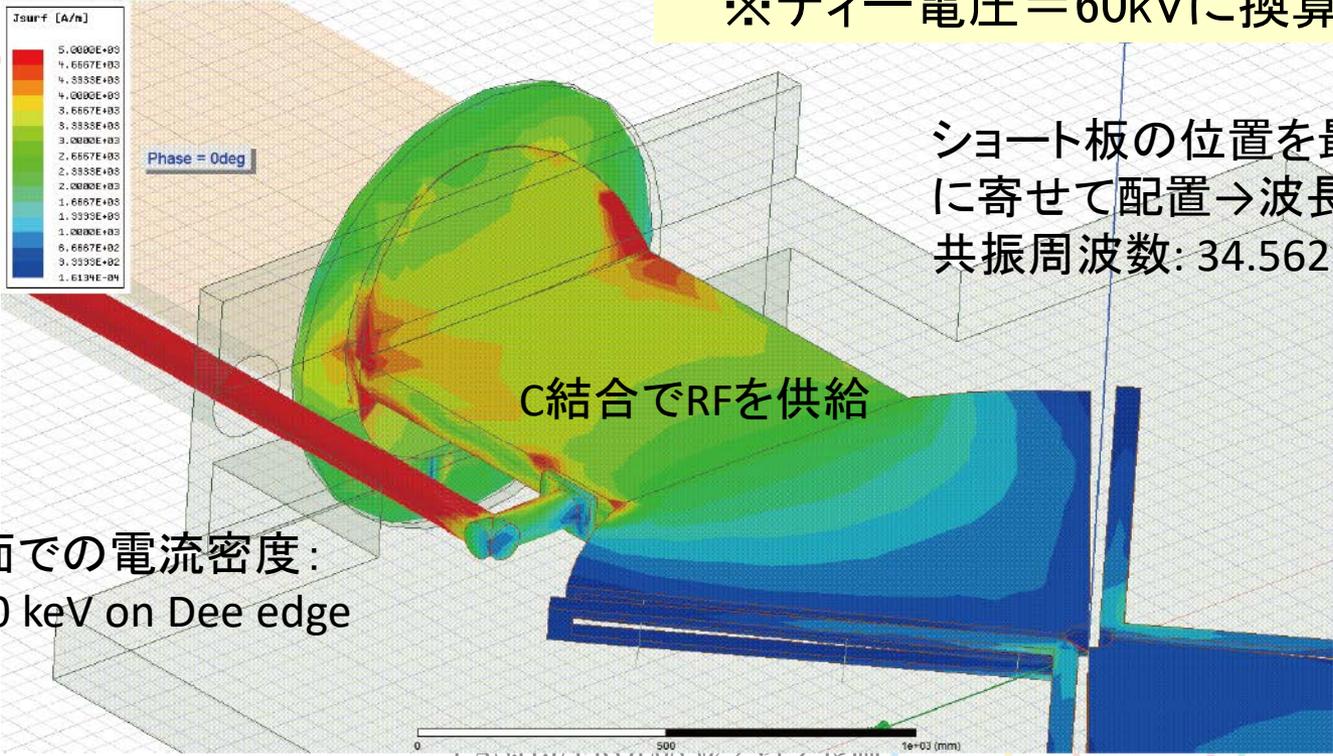


# Dee電極、共振器の設計

- RFに対する要請: > 33.6 MHz (最も需要の多いリング入射用 65 MeV 陽子の周回周波数の2倍の値(ハーモニクス 2)), >50 kV, C or L coupling
- 電氣的的要請: < 40 A/cm
- 機械的要請: 他の機器、既存のコイル等と干渉しない

※ディー電圧 = 60kV に換算した分布

電流密度分布

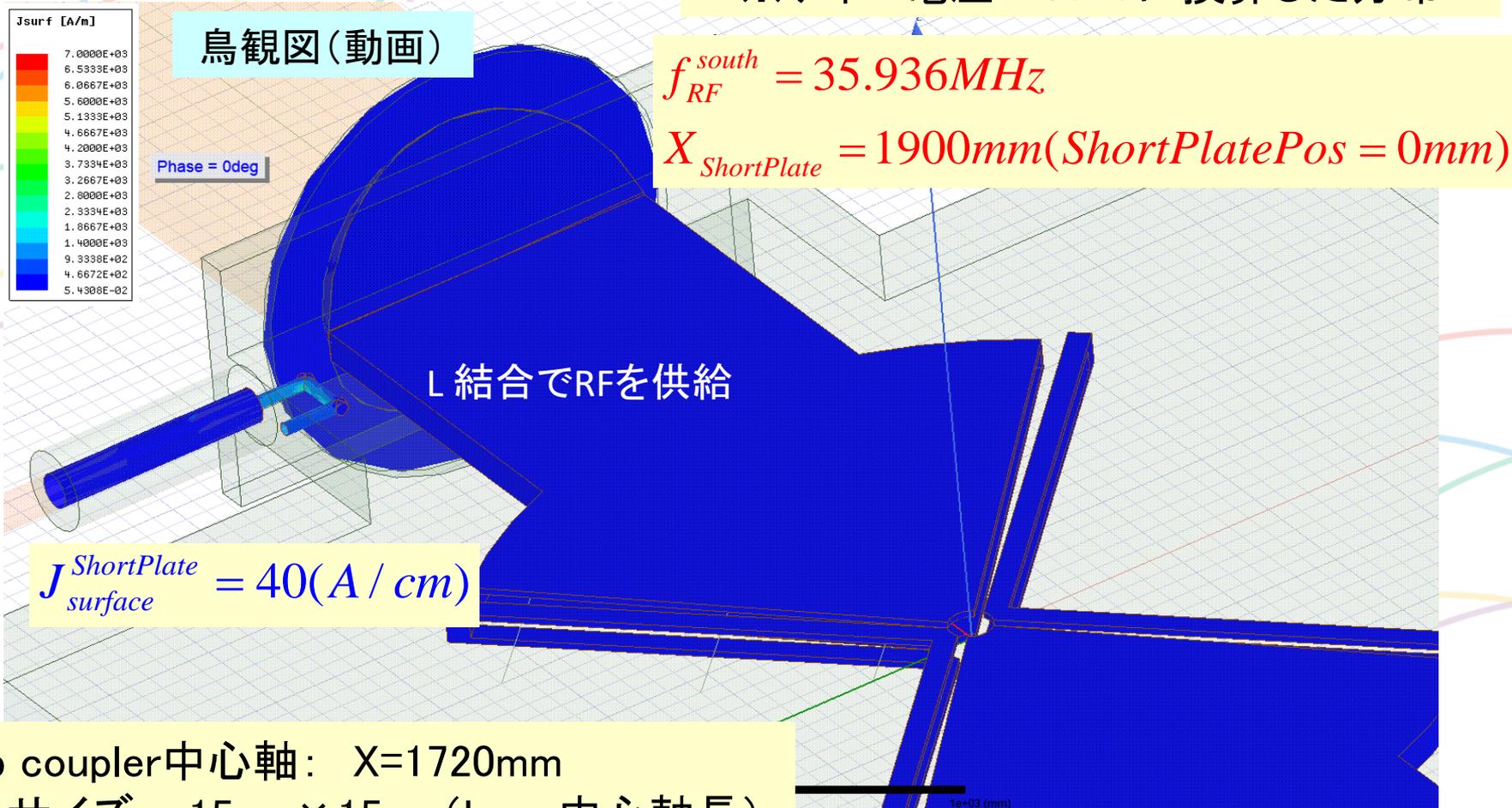


ショート板の位置を最も電磁石に寄せて配置 → 波長を最短に  
共振周波数: 34.562 MHz

ショート板表面での電流密度:  
40 A/cm @ 60 keV on Dee edge

# Dee電極、共振器の設計 (L結合の例)

※ディー電圧 = 60kVに換算した分布

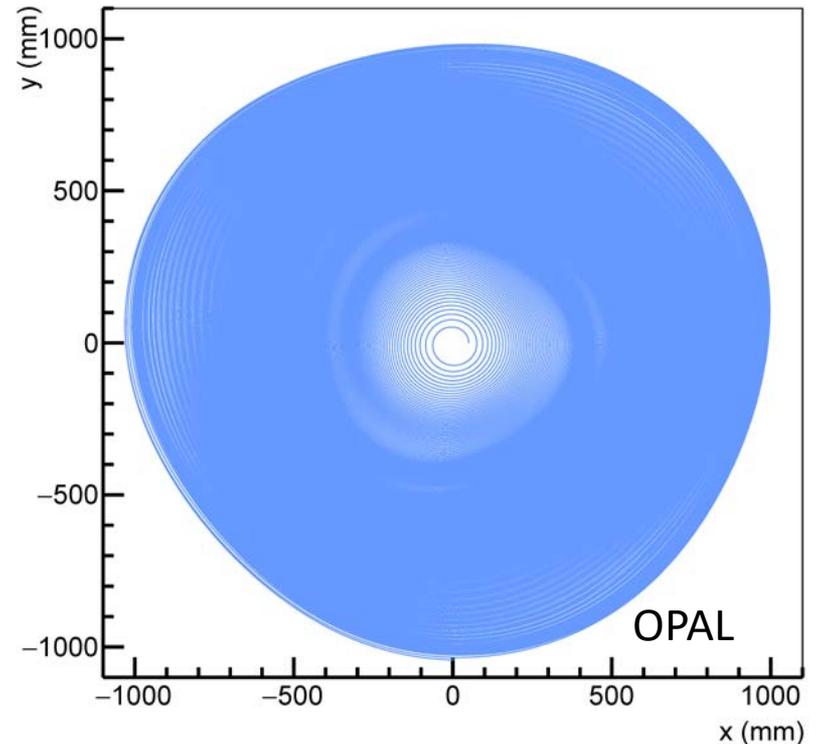
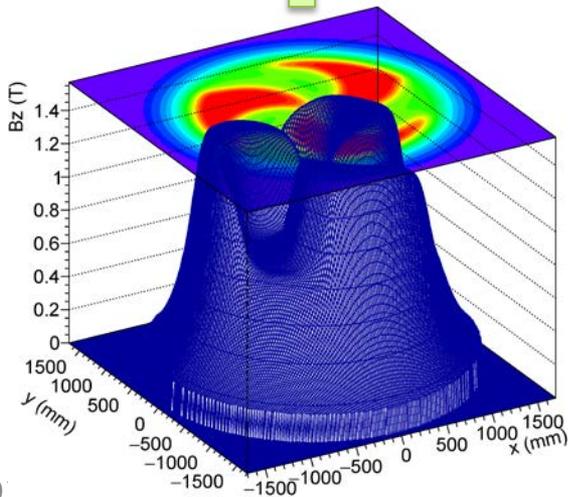
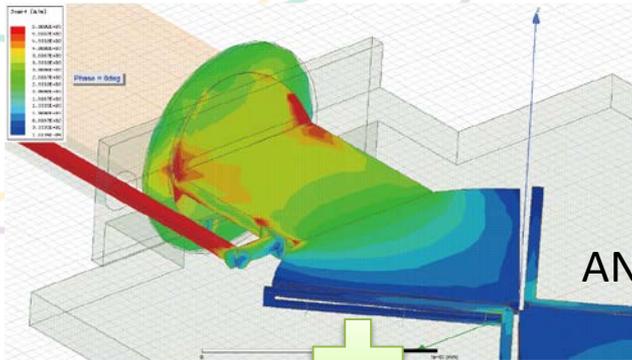


- Loop coupler中心軸: X=1720mm
- Loopサイズ: 15cm × 15cm (Loop中心軸長)

ANSYS HFSS

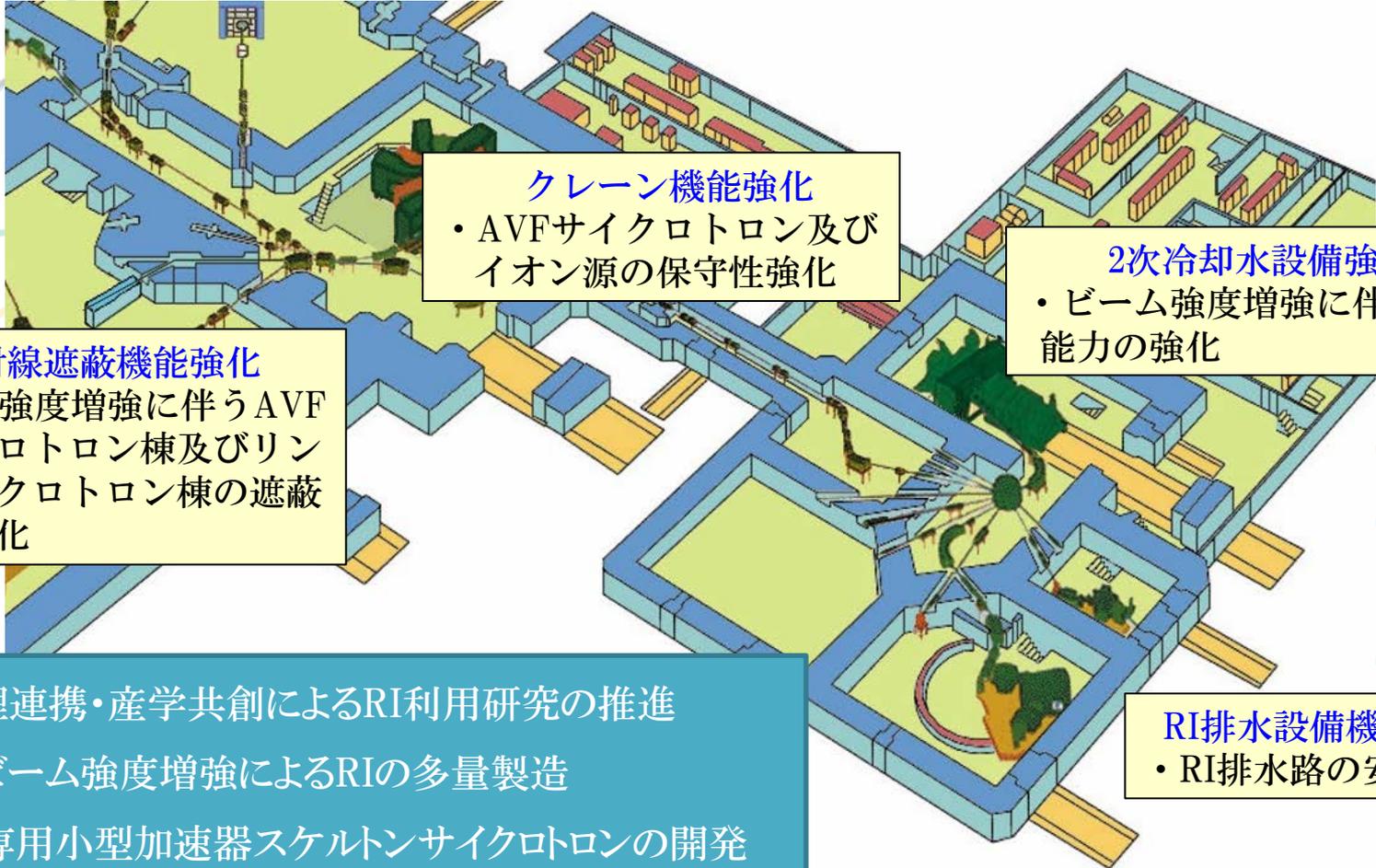
# OPALによる粒子軌道計算

- RFと等時性AVF磁場(陽子 65 MeV用)を入力
  - 60 keVの陽子をインフレクタを模した位置より出射
- Well Centered ではないが、加速を受けつつ64.8 MeVにまで周回する



引き出し部の設計: 中尾 (THP020)

# 施設機能強化



**クレーン機能強化**  
 ・ AVFサイクロトロン及び  
 イオン源の保守性強化

**2次冷却水設備強化**  
 ・ ビーム強度増強に伴う冷却  
 能力の強化

**放射線遮蔽機能強化**  
 ・ ビーム強度増強に伴うAVF  
 サイクロトロン棟及びリン  
 グサイクロトロン棟の遮蔽  
 能力強化

**医理連携・産学共創によるRI利用研究の推進**

- ・ ビーム強度増強によるRIの多量製造
- ・ 専用小型加速器スケルトンサイクロトロンの開発
- ・ 大量RI自動精製装置等の開発など

**RI排水設備機能強化**  
 ・ RI排水路の安全対策

# ユーザーとの連携： 加速器アップグレードで必要な作業

加速器

## イオン源

- 新イオン源の導入
- 既存イオン源の改造
- 引き出し電圧の高圧化
- 既知の問題点の改善
- AVFサイクロトロン改造のための一時撤去手順の検討

## AVFサイクロトロン

- 入射部の設計
- 2 Dee 化に伴う新しい高周波共振器の設計
- ビーム取り出し用電極の設計
- トリムコイル、バレーコイルの設計
- 各種プローブ、真空ポンプ等の配置
- 既知の問題点の改善

## 低エネルギービーム輸送

- 引き出し電圧の高圧化
- 垂直入射部の延長
- 偏極度への影響見積
- AVFサイクロトロンの改造のための一時撤去手順の検討

## 制御・モニター

- 既知の問題点の改善
- OSのアップグレード

ビームライン

## 中エネルギービーム輸送

- AVFサイクロトロン大強度化に伴う、大エミッタンスビームの輸送

## 高エネルギービーム輸送

- 実験コースごとのビームの最適化

## ビーム輸送の調整を効率化するモニター機器

- 高速エミッタンスモニターの開発
- ビューア位置の見直し

## 東実験室の有効活用

- 西実験室の混雑を解消
- 利用が増大している白色中性子ビーム、MuSICの効率的な運用
- 東実験室の既存機器との共存

放射線管理

## アップグレード作業の効率化のための変更

- 放射化物保管
- 管理区域の除外

## ビーム強度増大に伴う遮蔽強化

- 新しいビーム種、強度に対応した遮蔽計算
- Cコースのビームバルサー
- EコースのBNCTテストビームライン
- Kコース、FコースのRI製造
- WNコースの白色中性子源

## 実験の制限を少なくするためのビーム利用法の変更

- ユーザーのニーズの調査
- 空気通過による排気口における放出放射能の評価
- ユーザーによる変更申請用遮蔽計算を可能にするためのマニュアル化

## 変更申請

- 変更内容のとりまとめ
- 文章化と申請
- 放射線障害予防規定の改定

# ユーザーとの連携：作業分担

加速器グループ

## イオン源

- 新イオン源の導入
- 既存イオン源の改造
- 引き出し電圧の高圧化
- AVFサイクロトロン改造のための一時撤去手順の検討
- 既知の問題点の改善

## AVFサイクロトロン

- 入射部の設計
- 2 Dee 化に伴う新しい高周波共振器の設計
- ビーム取り出し用電極の設計
- トリムコイル、パレーコイルの設計
- 各種プローブ、真空ポンプ等の配置
- 既知の問題点の改善

## 低エネルギービーム輸送

- 引き出し電圧の高圧化
- 垂直入射部の延長
- 偏極度への影響見積
- AVFサイクロトロンの改造のための一時撤去手順の検討

## 制御・モニター

- 既知の問題点の改善
- OSのアップグレード

## 実験の制限を少なくするためのビーム利用法の変更

- 空気通過による排気口における放出放射能の評価

## アップグレード作業の効率化のための変更

- 作業手順を考慮した管理区域設定の検討
- 放射化物移動の位置と手順の検討

## ビーム強度増大に伴う遮蔽強化

- Cコースビームパルサー
- WNコースの白色中性子源

## 中エネルギービーム輸送

- AVFサイクロトロン大強度化に伴う、大エミッタンスビームの輸送
- ビュアー位置の見直し

ユーザー

## 高エネルギービーム輸送

- 実験コースごとのビームの最適化
- ビュアー位置の見直し

## ビーム輸送の調整を効率化するモニター機器

- 高速エミッタンスモニターの開発

## ビーム強度増大に伴う遮蔽強化

- EコースのBNCTテストビームライン
- Kコース、FコースのRI製造

## 東実験室の有効活用

- 西実験室の混雑を解消
- 利用が増大している白色中性子ビーム、MuSICの効率的な運用
- 東実験室の既存機器との共存

放射線管理室

## アップグレード作業の効率化のための変更

- 放射化物保管
- 管理区域の除外

## ビーム強度増大に伴う遮蔽強化

- 新しいビーム種、強度に対応した遮蔽計算

## 実験の制限を少なくするためのビーム利用法の変更

- ユーザーのニーズの調査
- ユーザーによる変更申請用遮蔽計算を可能にするためのマニュアル化

## 変更申請

- 変更内容のとりまとめ
- 文章化と申請
- 放射線障害予防規定の改定

# ユーザーとの連携：作業分担

加速器グループ

## イオン源

- 新イオン源の導入
- 既存イオン源の改造
- 引き出し電圧の高圧化
- AVFサイクロトロン改造のための一時撤去手順の検討
- 既知の問題点の改善

## AVFサイクロトロン

- 入射部の設計
- 2 Dee 化に伴う新しい高周波共振器の設計
- ビーム取り出し用電極の設計
- トリムコイル、パレーコイルの設計
- 各種プローブ、真空ポンプ等の配置
- 既知の問題点の改善

## 低エネルギービーム輸送

- 引き出し電圧の高圧化
- 垂直入射部の延長
- 偏極度への影響見積
- AVFサイクロトロンの改造のための一時撤去手順の検討

## 制御・モニター

- 既知の問題点の改善
- OSのアップグレード

## 実験の制限を少なくするためのビーム利用法の変更

- 空気通過による排気口における放出放射能の評価

## アップグレード作業の効率化のための変更

- 作業手順を考慮した管理区域設定の検討
- 放射化物移動の位置と手順の検討

## ビーム強度増大に伴う遮蔽強化

- Cコースビームパルサー
- WNコースの白色中性子源

## 中エネルギービーム輸送

- AVFサイクロトロン大強度化に伴う、大エミッタンスビームの輸送
- ビュアー位置の見直し

ユーザー

## 高エネルギービーム輸送

- 実験コースごとのビームの最適化
- ビュアー位置の見直し

## ビーム輸送の調整を効率化するモニター機器

- 高速エミッタンスモニターの開発

## ビーム強度増大に伴う遮蔽強化

- EコースのBNCTテストビームライン
- Kコース、FコースのRI製造

## 東実験室の有効活用

- 西実験室の混雑を解消
- 利用が増大している白色中性子ビーム、MuSICの効率的な運用
- 東実験室の既存機器との共存

放射線管理室

## アップグレード作業の効率化のための変更

- 放射化物保管
- 管理区域の除外

## ビーム強度増大に伴う遮蔽強化

- 新しいビーム種、強度に対応した遮蔽計算

## 実験の制限を少なくするためのビーム利用法の変更

- ユーザーのニーズの調査
- ユーザーによる変更申請用遮蔽計算を可能にするためのマニュアル化

## 変更申請

- 変更内容のとりまとめ
- 文章化と申請
- 放射線障害予防規定の改定

# ユーザーとの連携： タスクフォース(作業部会)

ビーム輸送

## 低エネルギービーム輸送

- 引き出し電圧の高圧化
- 垂直入射部の延長
- 偏極度への影響見積
- AVFサイクロトロン改造のための一時撤去手順の検討

## 中エネルギービーム輸送

- AVFサイクロトロン大強度化に伴う、大エミッタンスビームの輸送
- ビュアー位置の見直し

## 高エネルギービーム輸送

- 実験コースごとのビームの最適化
- ビュアー位置の見直し

## ビーム輸送の調整を効率化するモニター機器

- 高速エミッタンスモニターの開発

変更申請・遮蔽計算

## 実験の制限を少なくするためのビーム利用法の変更

- 空気通過による排気口における放出放射能の評価

## アップグレード作業の効率化のための変更

- 作業手順を考慮した管理区域設定の検討
- 放射化物移動の位置と手順の検討

## ビーム強度増大に伴う遮蔽強化

- Cコースビームパルサー
- WNコースの白色中性子源

## ビーム強度増大に伴う遮蔽強化

- EコースのBNCTテストビームライン
- Kコース、FコースのRI製造

## アップグレード作業の効率化のための変更

- 放射化物保管
- 管理区域の除外

## ビーム強度増大に伴う遮蔽強化

- 新しいビーム種、強度に対応した遮蔽計算

## 実験の制限を少なくするためのビーム利用法の変更

- ユーザーのニーズの調査
- ユーザーによる変更申請用遮蔽計算を可能にするためのマニュアル化

## 変更申請

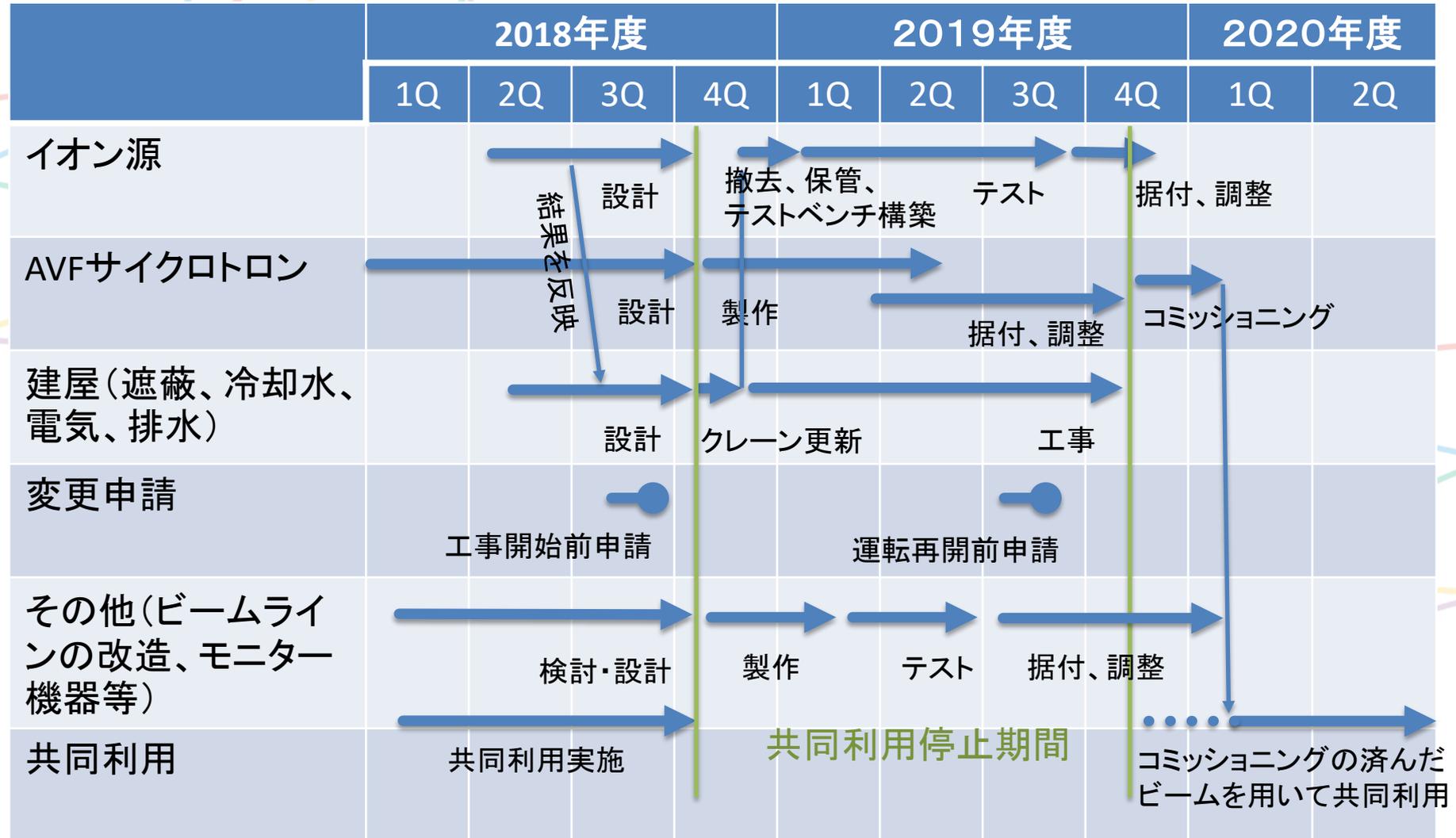
- 変更内容のとりまとめ
- 文章化と申請
- 放射線障害予防規定の改定

東実験室活用

## 東実験室の有効活用

- 西実験室の混雑を解消
- 利用が増大している白色中性子ビーム、MuSICの効率的な運用
- 東実験室の既存機器との共存

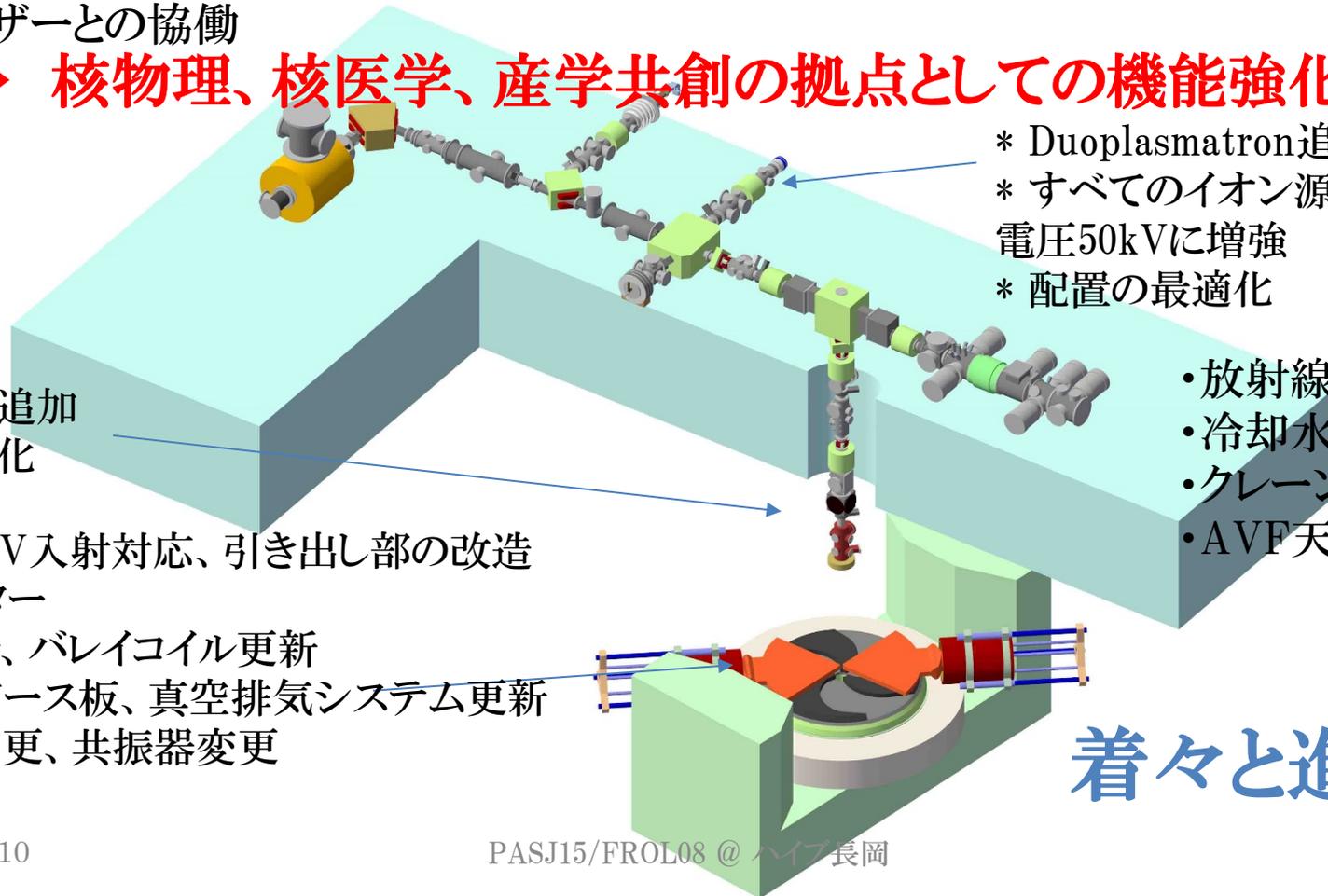
# 作業スケジュール(案)



# まとめ / H29～31年度のアップグレード

- 高強度、低エミッタンス化を目指したイオン源からAVF入射までの改良と2Dee化、内部オーバーホール、付属設備の更新。
- 2019年1月から約1年間のマシンタイム停止と改修工事
- ユーザーとの協働

## → 核物理、核医学、産学共創の拠点としての機能強化



- \* Duoplasmatron追加
- \* すべてのイオン源を引き出し電圧50kVに増強
- \* 配置の最適化

- 診断機器追加
- 配置最適化

- 放射線遮蔽強化
- 冷却水機能強化
- クレーン増設
- AVF天井かさ上げ

- 中心部50kV入射対応、引き出し部の改造
- ヨークリフター
- トリムコイル、バレイコイル更新
- 真空箱、アース板、真空排気システム更新
- Dee電極変更、共振器変更

着々と進行中