

学術領域「中性子星核物質」 A01班(高橋)、A02班(田村)、B01班(村上)主催 研究会
「高密度核物質に挑む実験の将来 - 施設・装置の観点から」
2015年12月5日 @ 理研仁科センター仁科ホール

RCNPにおける加速器開発の展望

大阪大学 核物理研究センター (RCNP)

福田 光宏

Contents

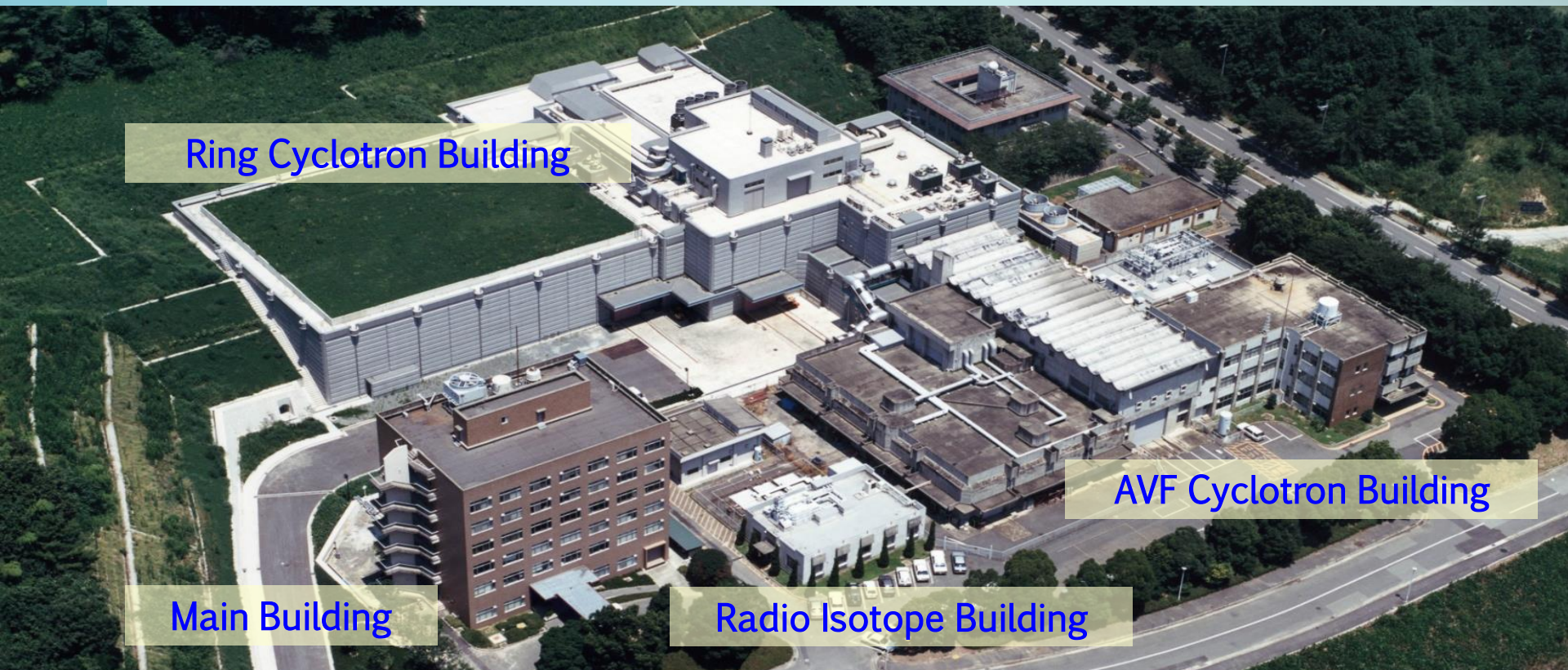
1. RCNPサイクロトロン施設の現状
2. これまでの次期計画検討状況
3. 次期計画の加速器は . . .



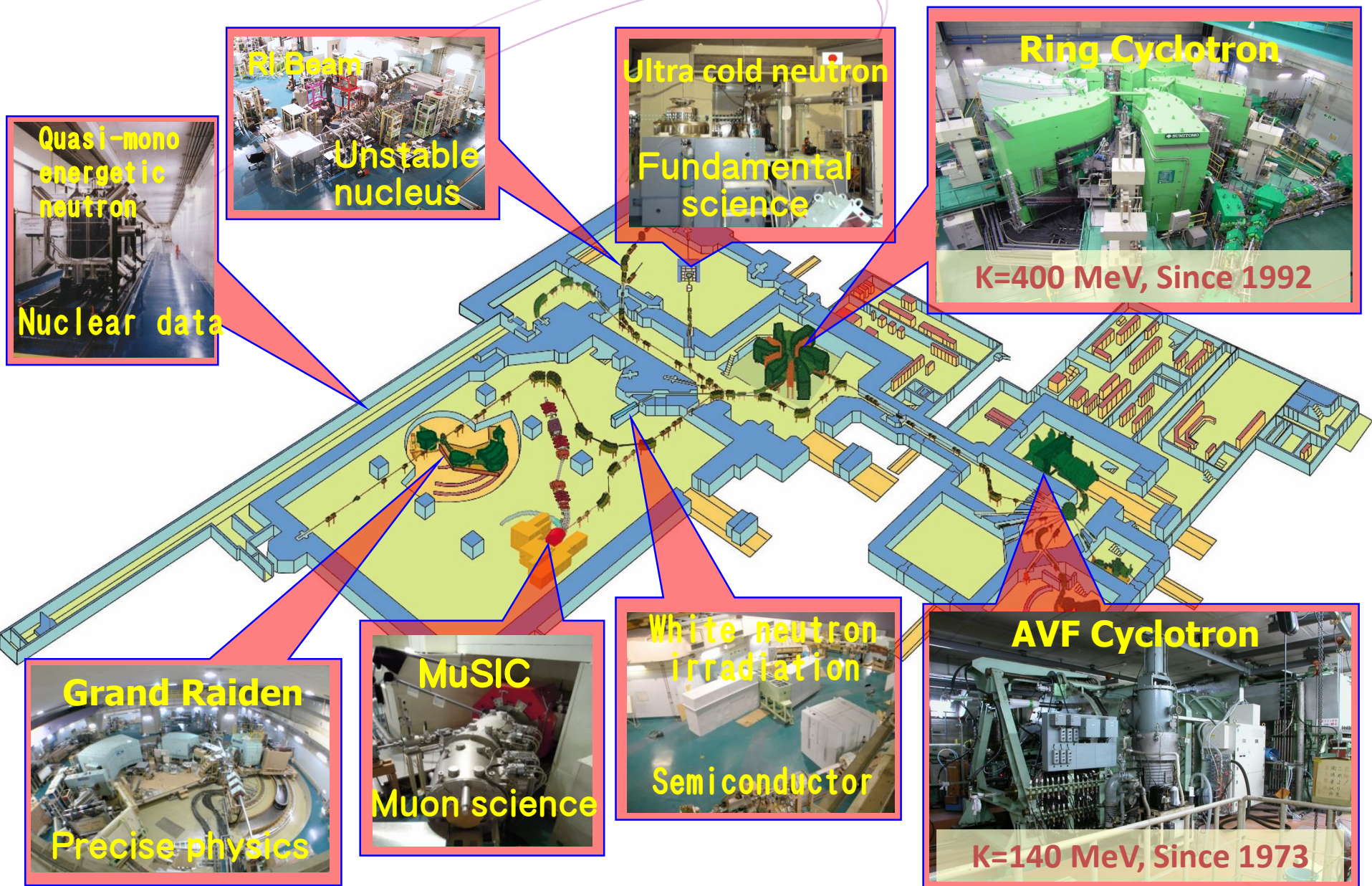
1. RCNPサイクロトロン施設の現状

Research Center for Nuclear Physics

- 1971 Foundation of RCNP
- 1973 Completion of the AVF cyclotron facility (42 years old)
- 1976 Experiments started.
- 1991 Completion of the Ring cyclotron facility



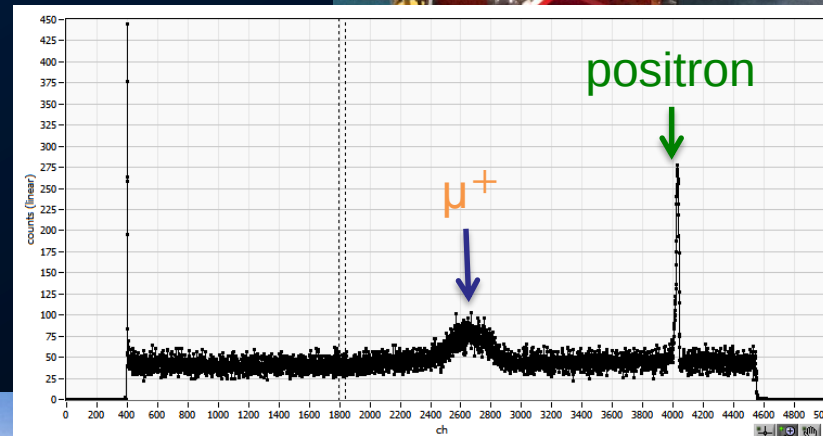
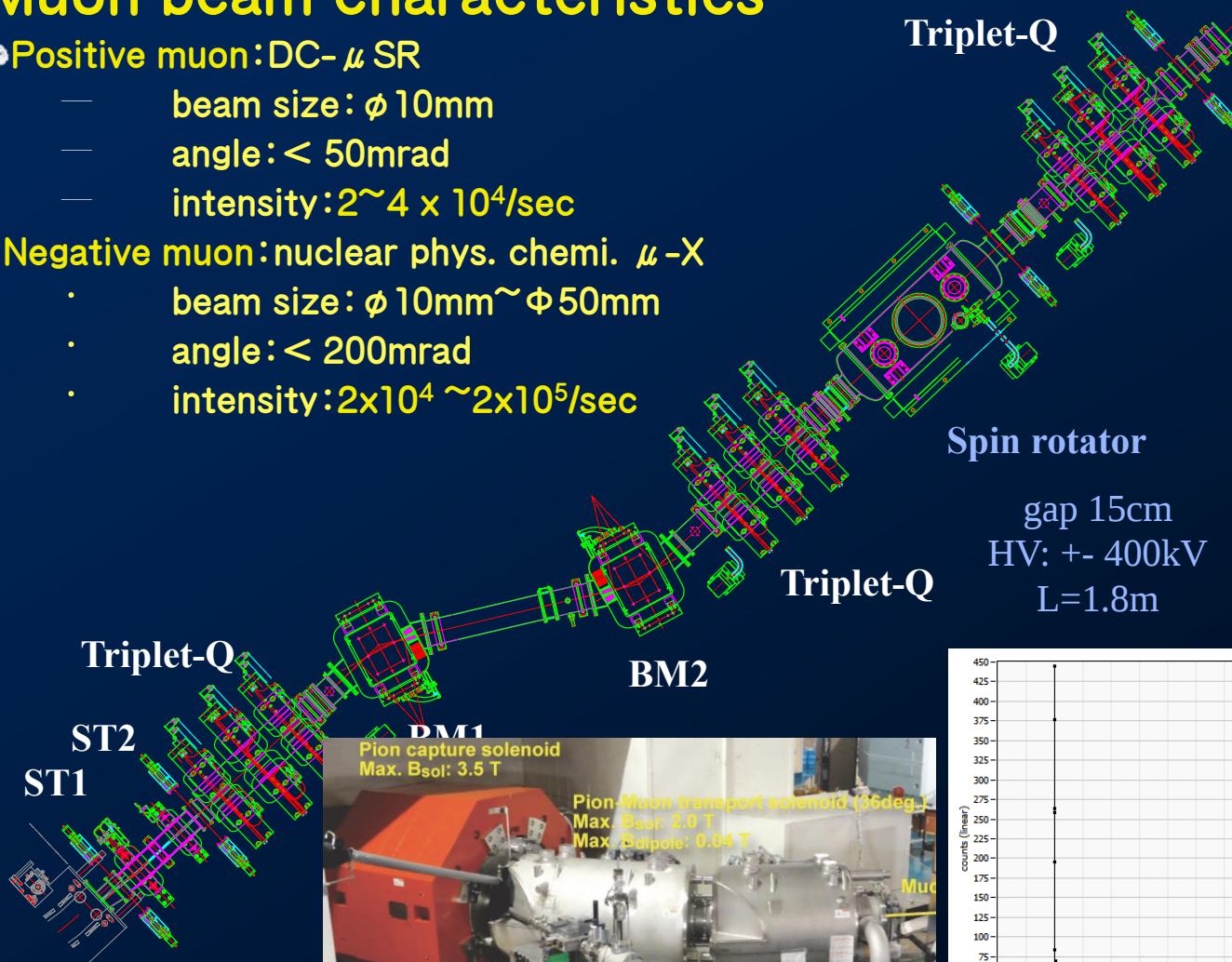
RCNP Cyclotron Facility



New DC muon beam line for MuSIC at RCNP

Muon beam characteristics

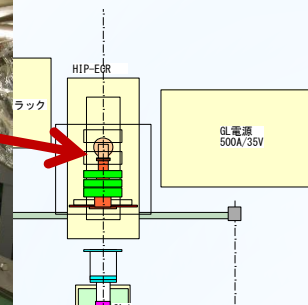
- **Positive muon: DC- μ SR**
 - beam size: ϕ 10mm
 - angle: $< 50\text{mrad}$
 - intensity: $2 \sim 4 \times 10^4/\text{sec}$
- **Negative muon: nuclear phys. chemi. μ -X**
 - beam size: ϕ 10mm $\sim$ ϕ 50mm
 - angle: $< 200\text{mrad}$
 - intensity: $2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5/\text{sec}$



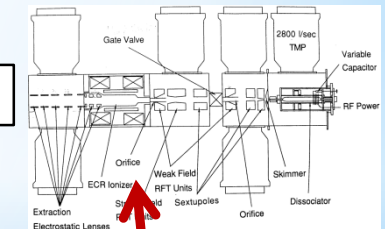
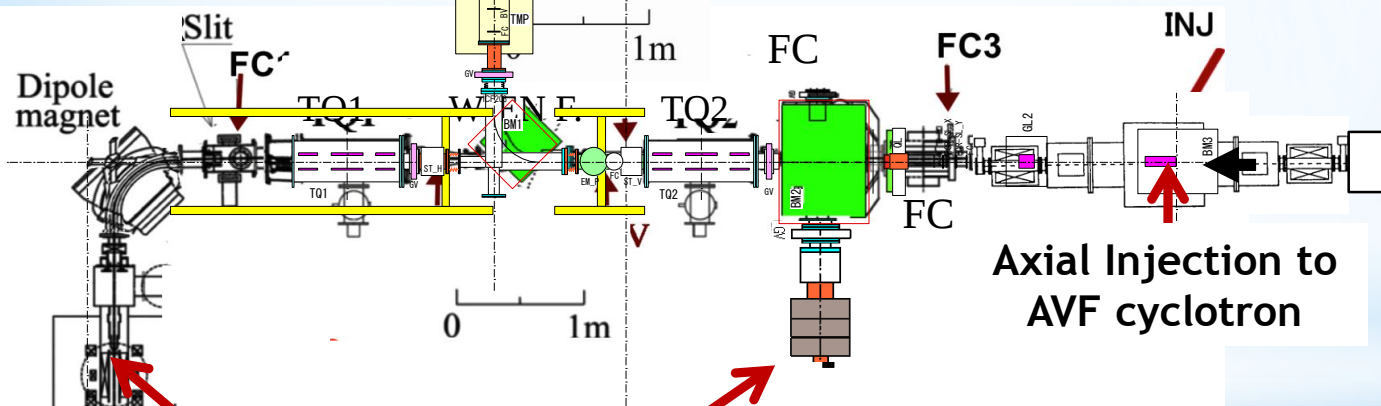
* Ion source complex for production of a wide variety of ions



HIPECR



18GHz SC-ECR for heavy ions
NEOMAFIOS for p, d, He, Li ~ Mg, Ar
2.45GHz HIPECR for intense p
HIPIS for polarized p, d



SC-ECR



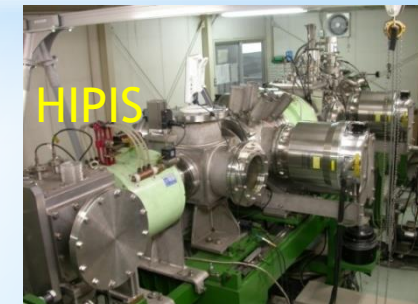
NEOMAFIOS

Typical transmission through
AVF cyclotron is 5 - 7 %.

90 % emittance:

$$\varepsilon_x = 6\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad},$$

$$\varepsilon_y = 10\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$$



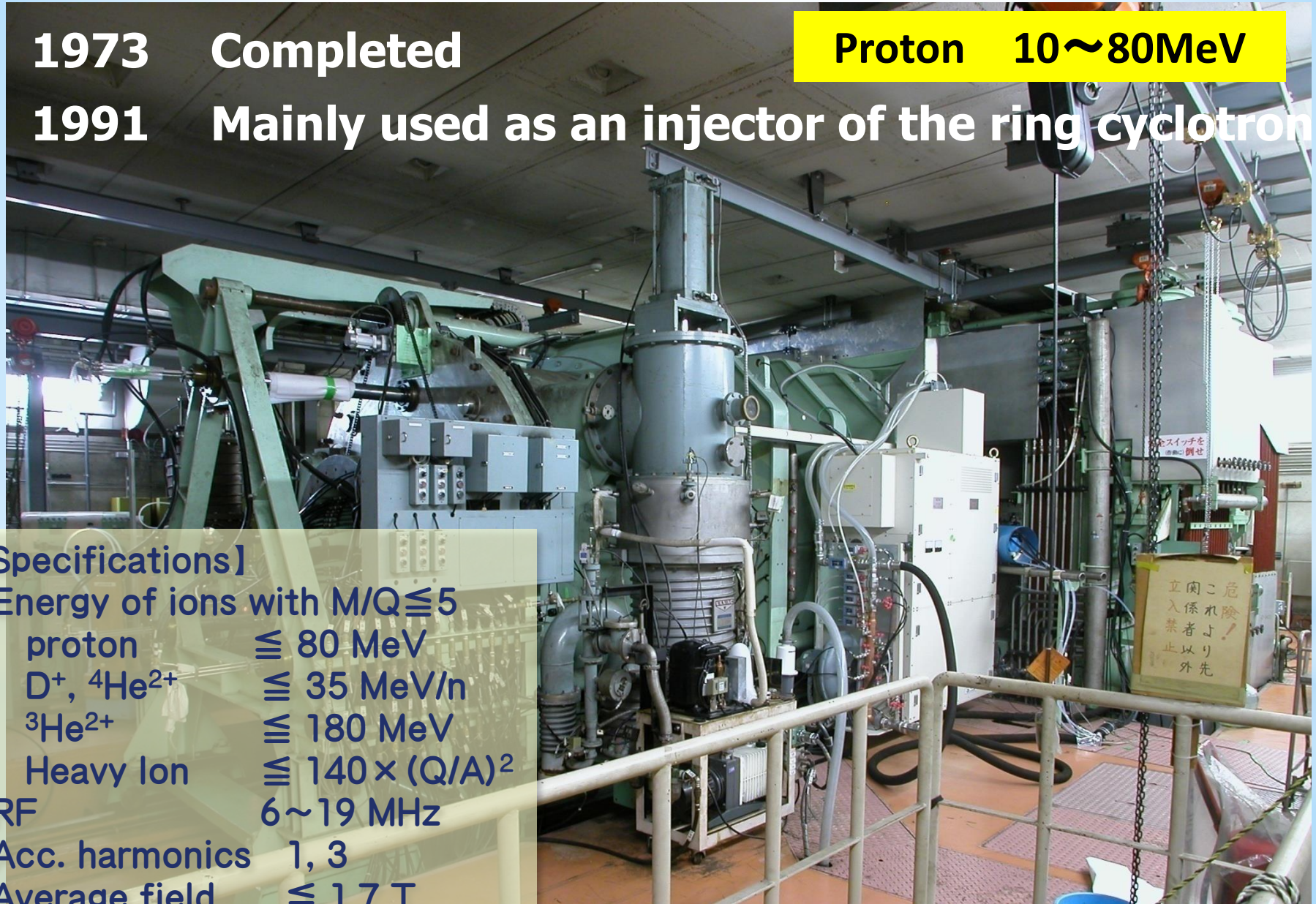
HIPIS

* RCNP K140 AVF Cyclotron

1973 Completed

Proton 10~80MeV

1991 Mainly used as an injector of the ring cyclotron



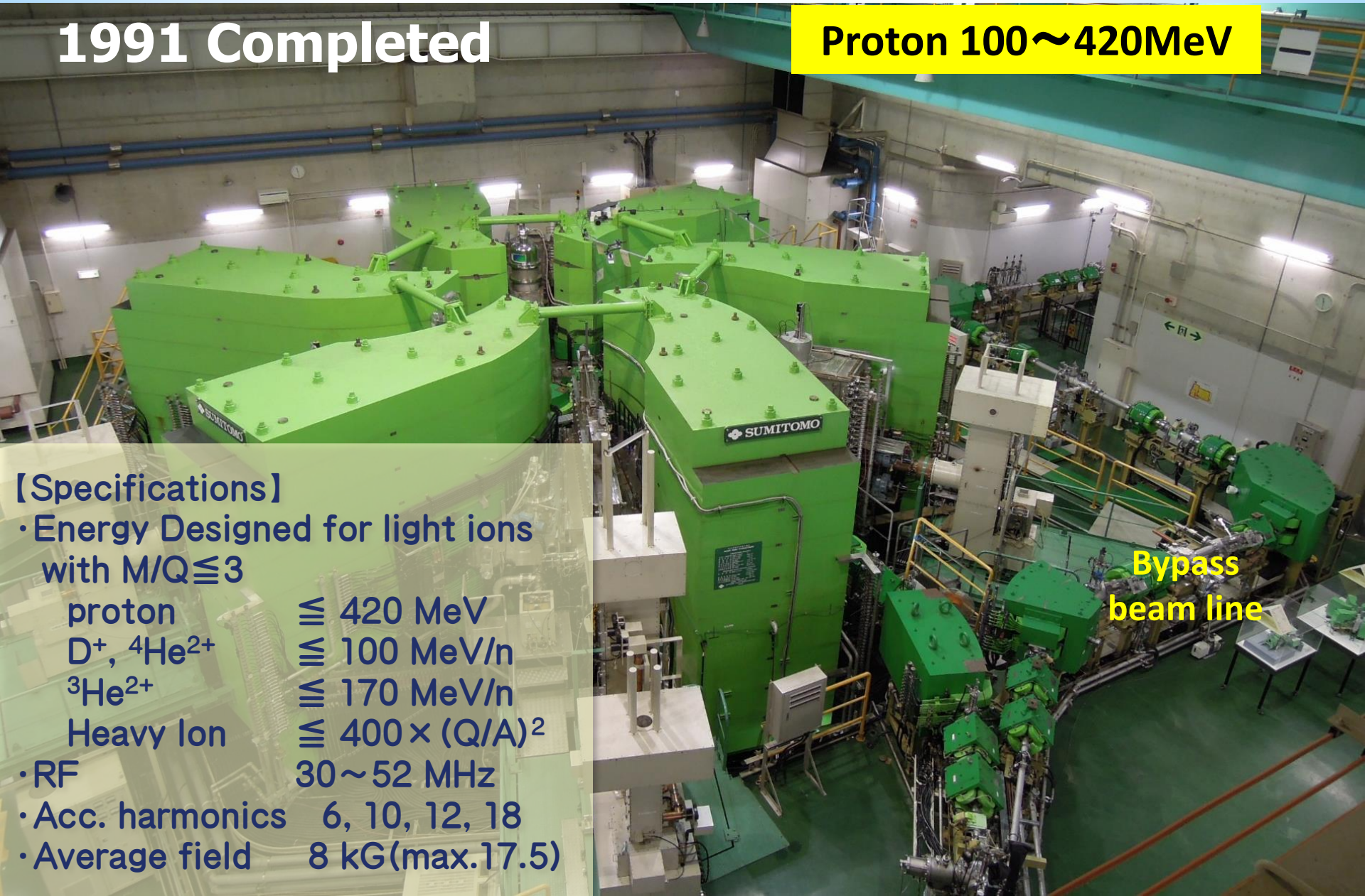
【Specifications】

- Energy of ions with $M/Q \leq 5$
 - proton ≤ 80 MeV
 - $D^+, {}^4\text{He}^{2+}$ ≤ 35 MeV/n
 - ${}^3\text{He}^{2+}$ ≤ 180 MeV
 - Heavy Ion $\leq 140 \times (Q/A)^2$
- RF 6~19 MHz
- Acc. harmonics 1, 3
- Average field ≤ 1.7 T

* RCNP K400 Ring Cyclotron

1991 Completed

Proton 100~420MeV

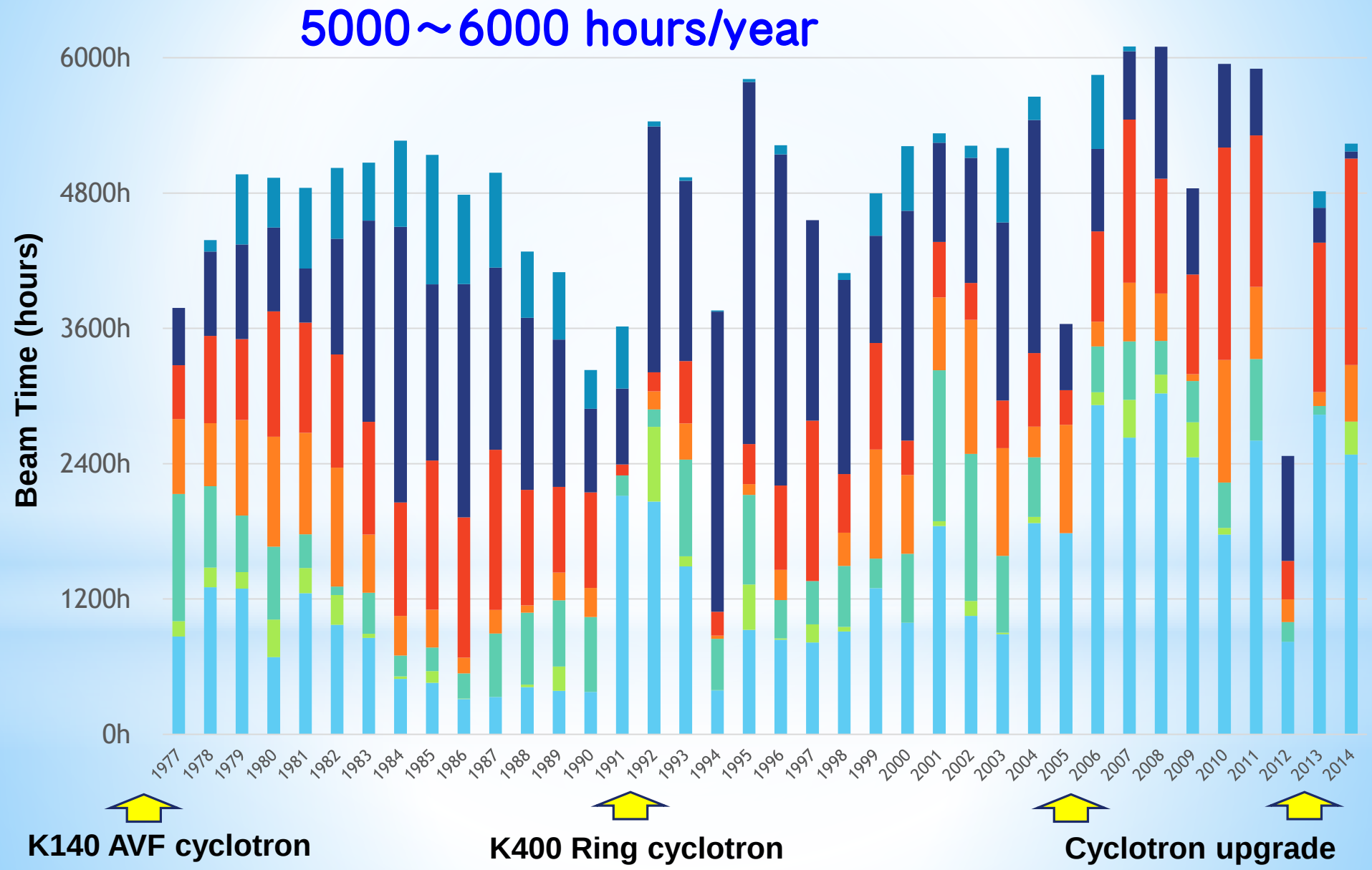


【Specifications】

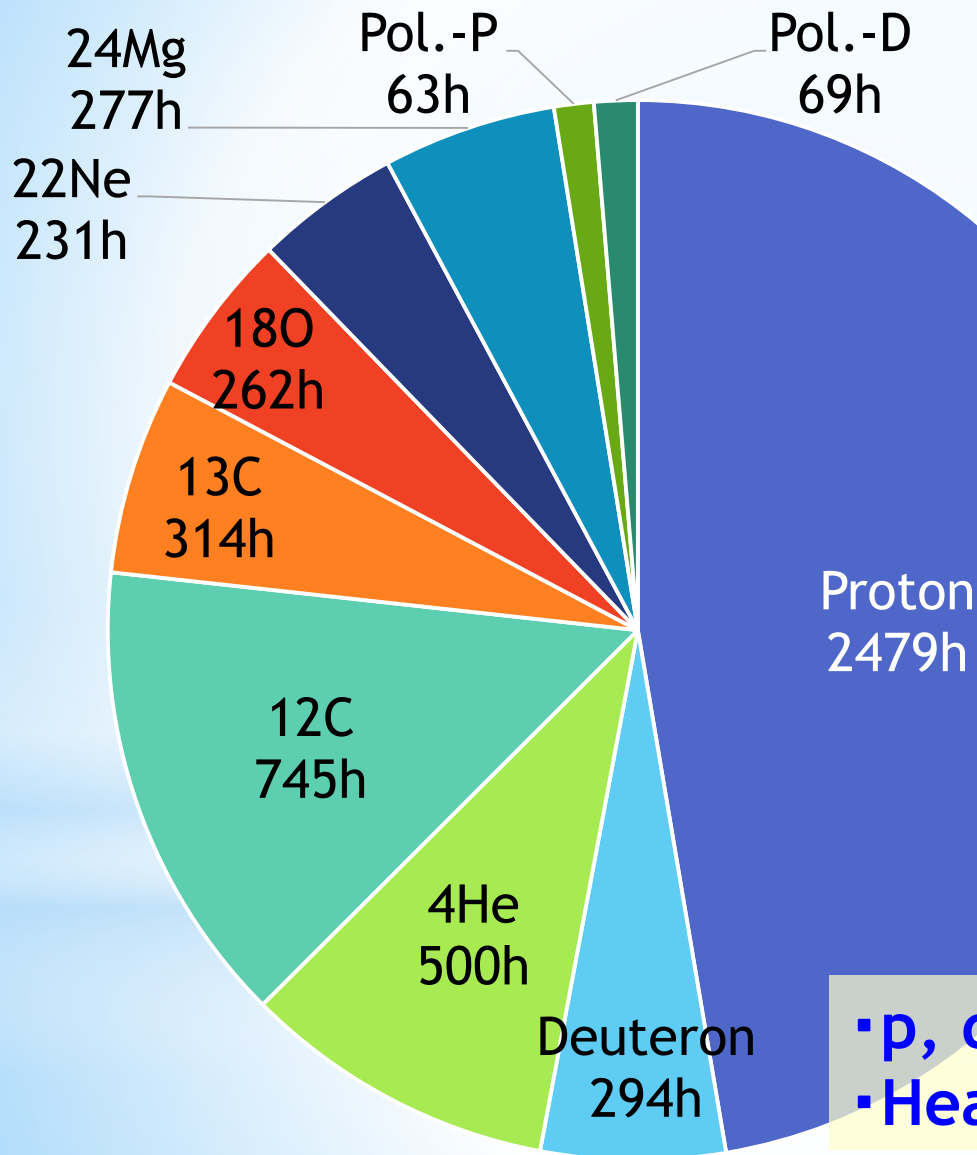
- Energy Designed for light ions with $M/Q \leq 3$
 - proton ≤ 420 MeV
 - D^+ , ${}^4\text{He}^{2+}$ ≤ 100 MeV/n
 - ${}^3\text{He}^{2+}$ ≤ 170 MeV/n
 - Heavy Ion $\leq 400 \times (Q/A)^2$
- RF 30 ~ 52 MHz
- Acc. harmonics 6, 10, 12, 18
- Average field 8 kG(max.17.5)

Bypass
beam line

* Annual Operation Time from 1977 to 2014



* Cyclotron Operation Data in JFY2014



Total : 5239 hours
(Experiments, beam tuning,
beam developments)

• p, d, ^3He , ^4He : 3408 h
• Heavy ions ($\geq ^{12}\text{C}$) : 1830 h



Update program of Cyclotron Facility in JFY2013

Ring cyclotron

- Modification of a fine tuning system of the flattop cavity
- Renewal of electrostatic and magnetic channels for injection and extraction: EIC, EEC, MIC, MEC
- **New high-temperature superconducting switching magnet**

Control system

- Upgrade of OS and interlock system

LEBT system

- New buncher
- Additional glazer lens

MuSIC

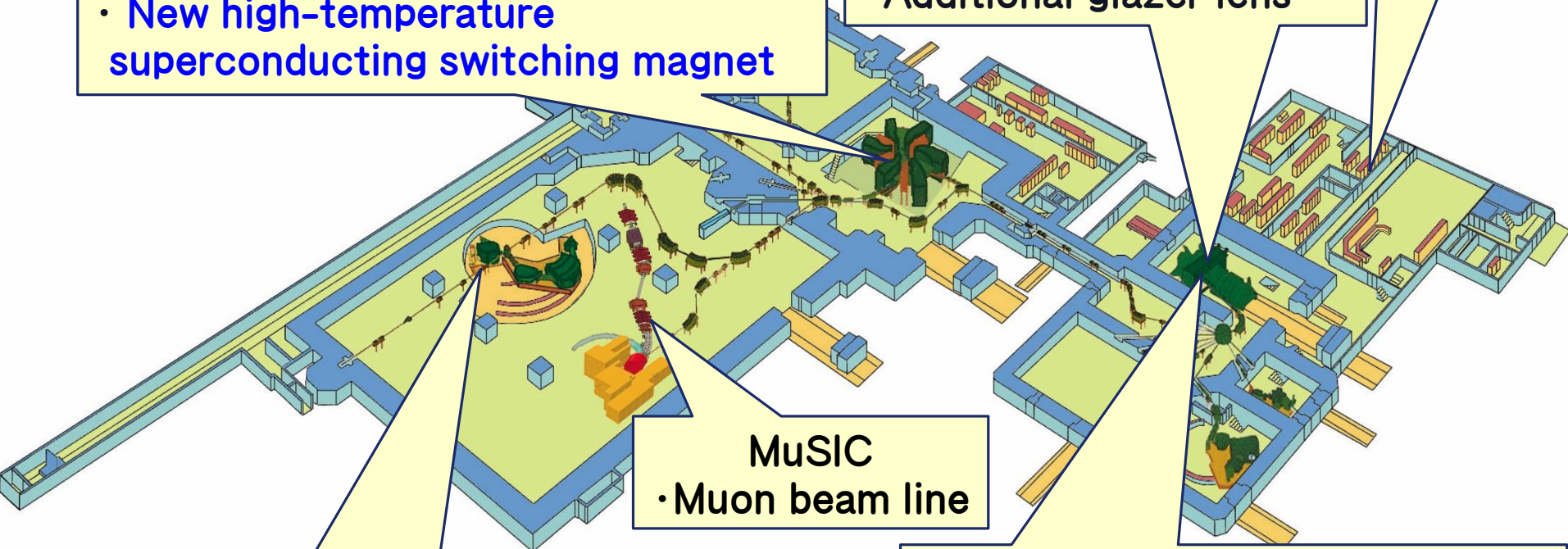
- Muon beam line

Grand-RAIDEN

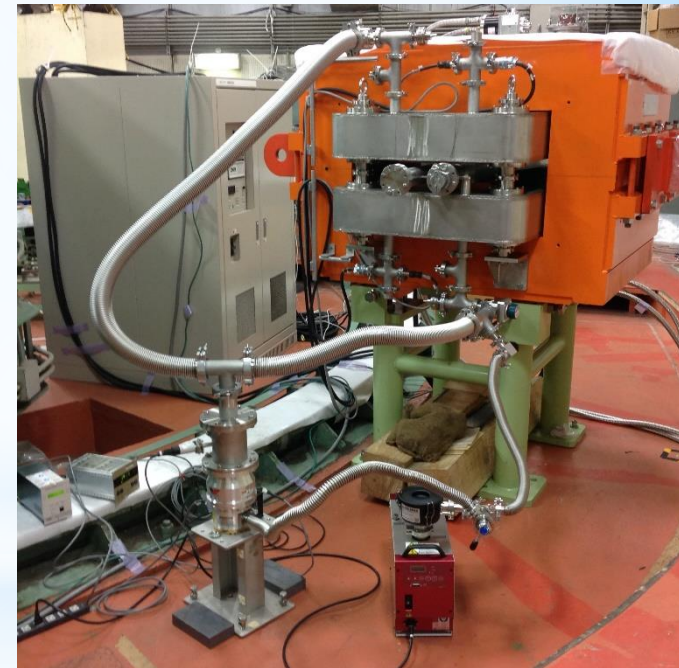
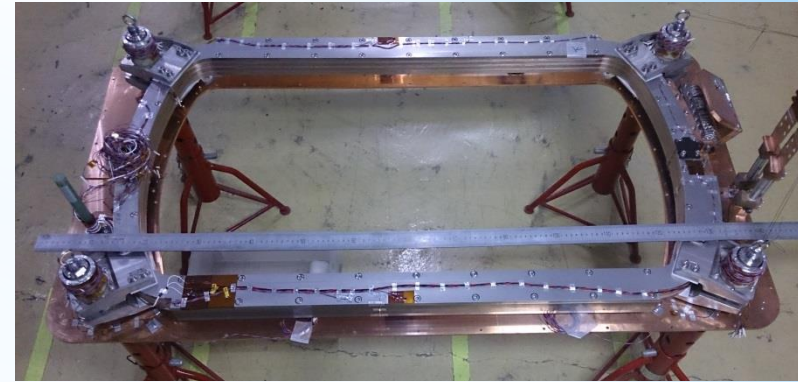
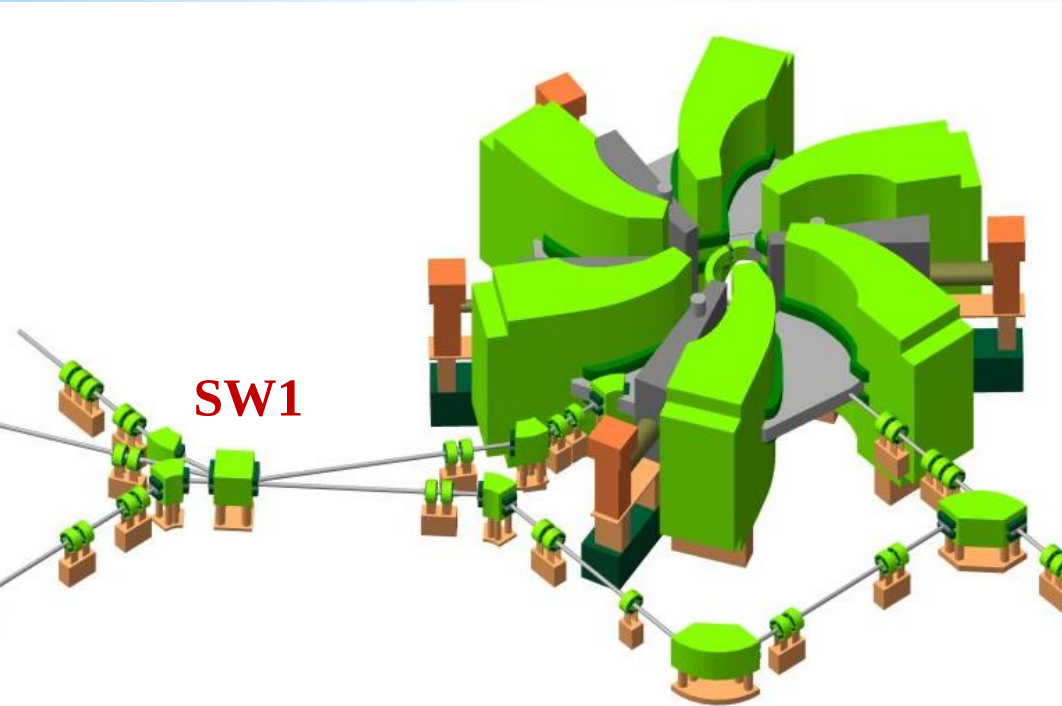
- New forward beam line

AVF cyclotron resonator

- Replacement of the connection part between a Dee electrode and a cavity



High Temp. Superconducting Switching magnet SW1



For parallel experiments by time-sharing
for UCN and MuSIC

Pulse mode operation:

Lumping speed $< \pm 20$ A/s

Typical sequence:

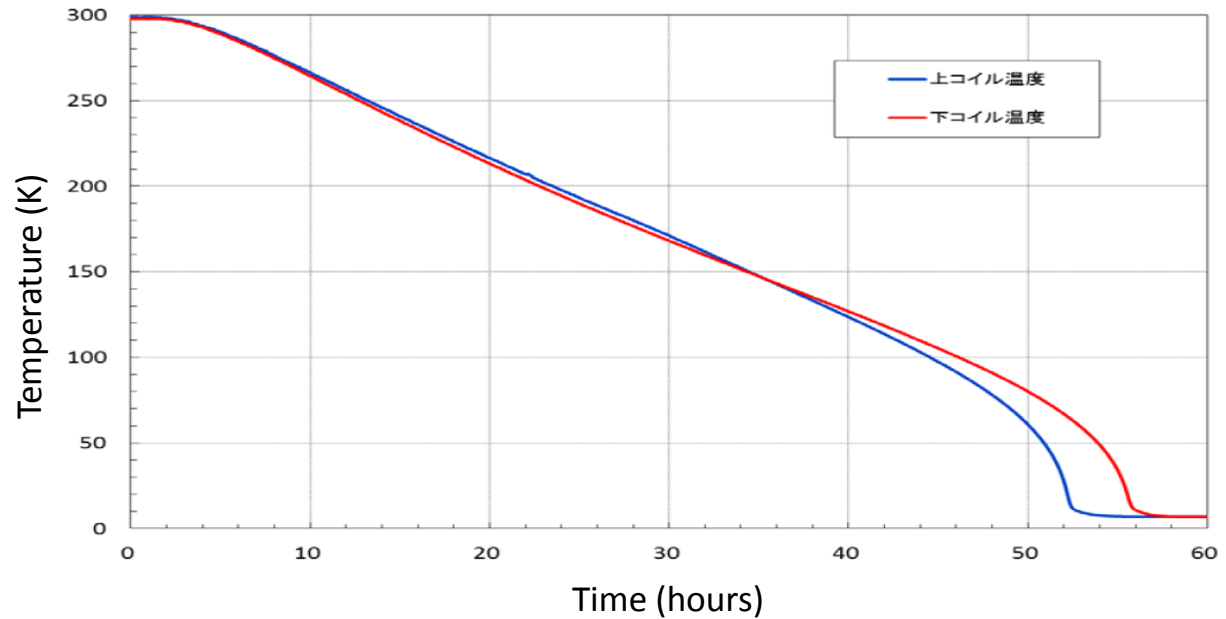
0 A - (10s) $\rightarrow$ 200 A - (100s) $\rightarrow$ 200 A - (10s) $\rightarrow$ 0 A $\rightarrow$ (300s)

SC Wire: Sumitomo Electric Industry, DI-BSCCO TYPE Hti-CA50
 4.6 ± 0.3 mmW $\times$ 0.41 ± 0.04 t, I_c @ 77 K, self field ≥ 180 A

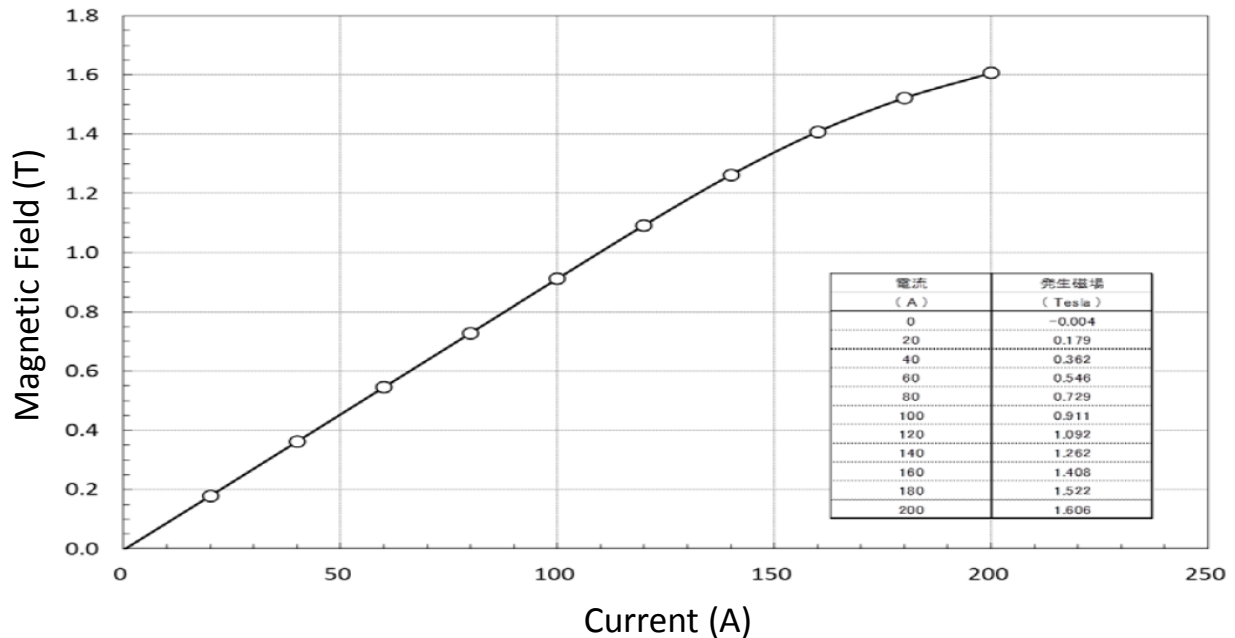
Performance test of High Temp. Superconducting Switching magnet

Test at Niihama
Plant of SHI

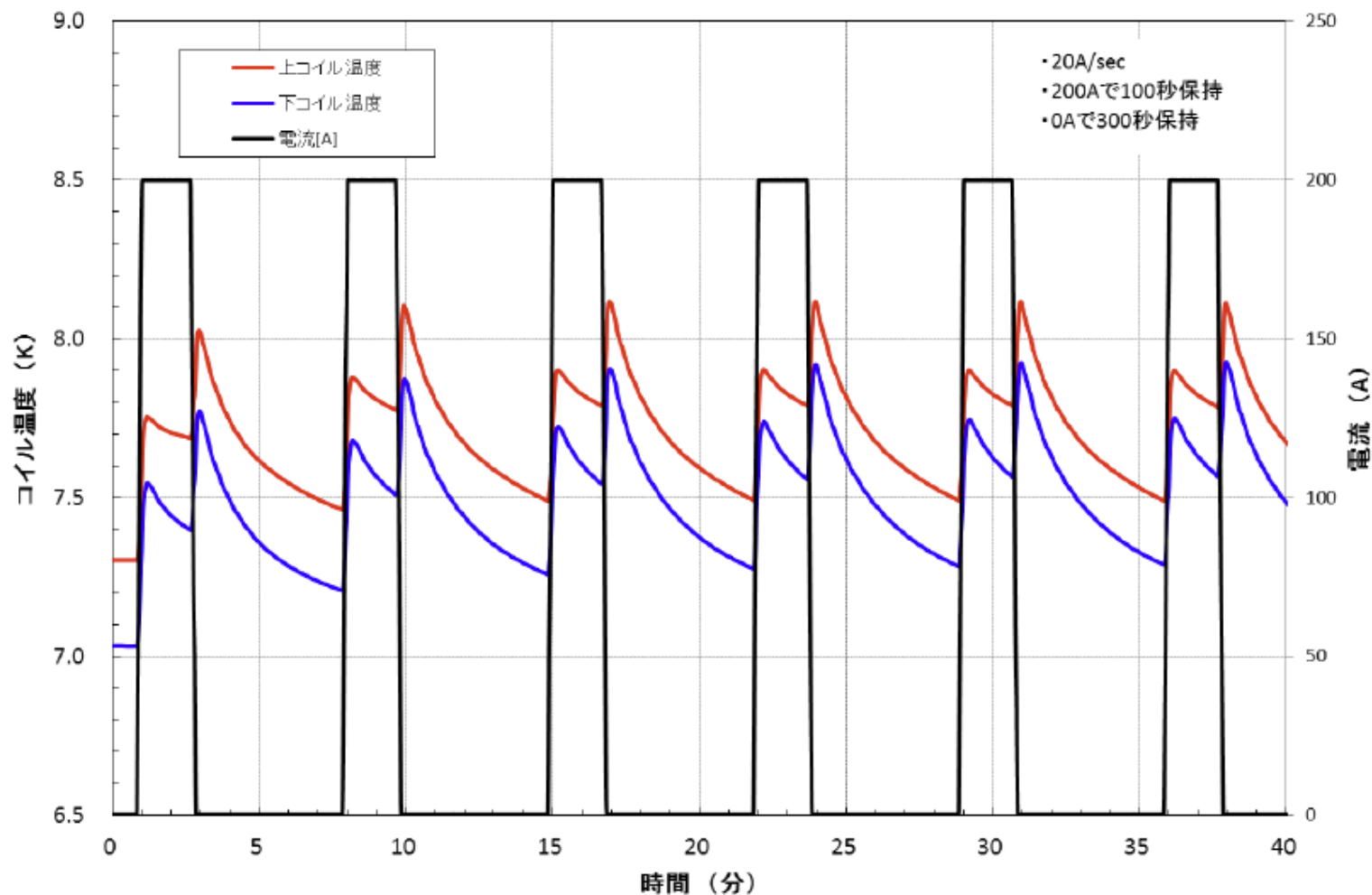
Initial cool down



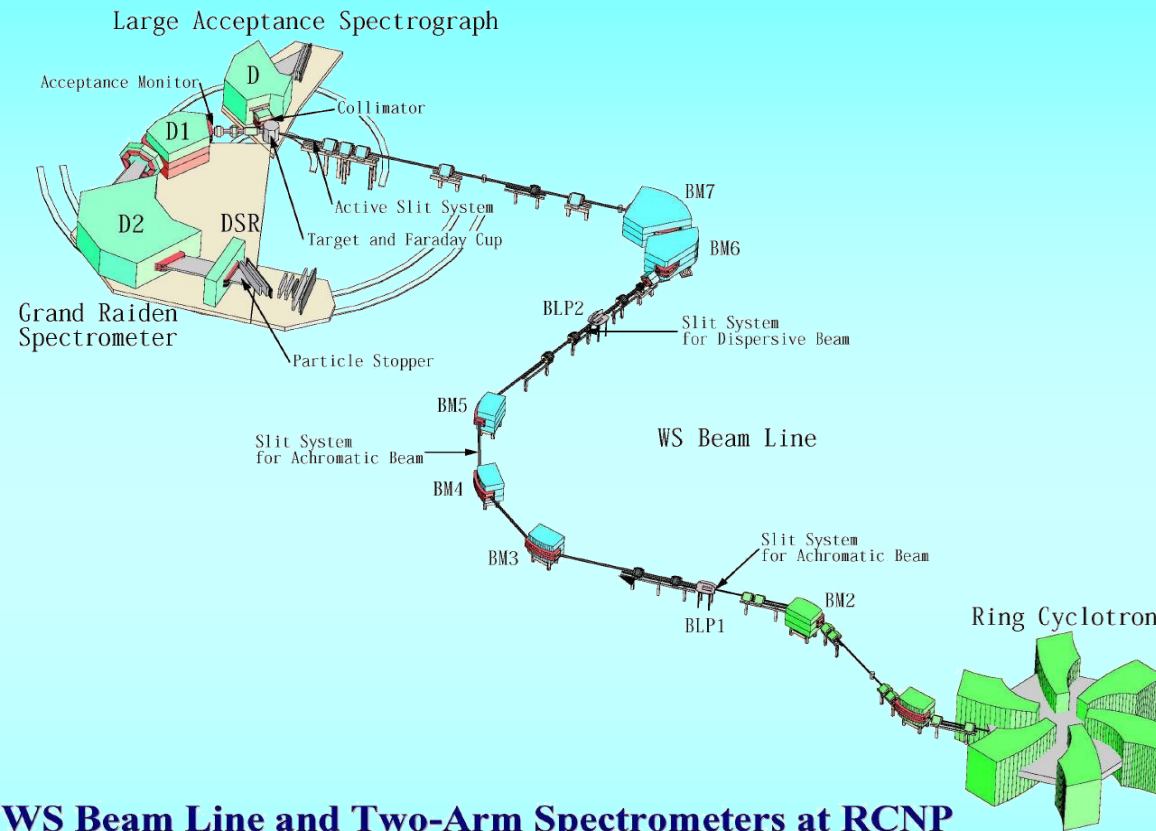
Excitation curve



2. 連続パターン運転



Lateral and Angular dispersion matching between WS-beam line and Grand RAIDEN



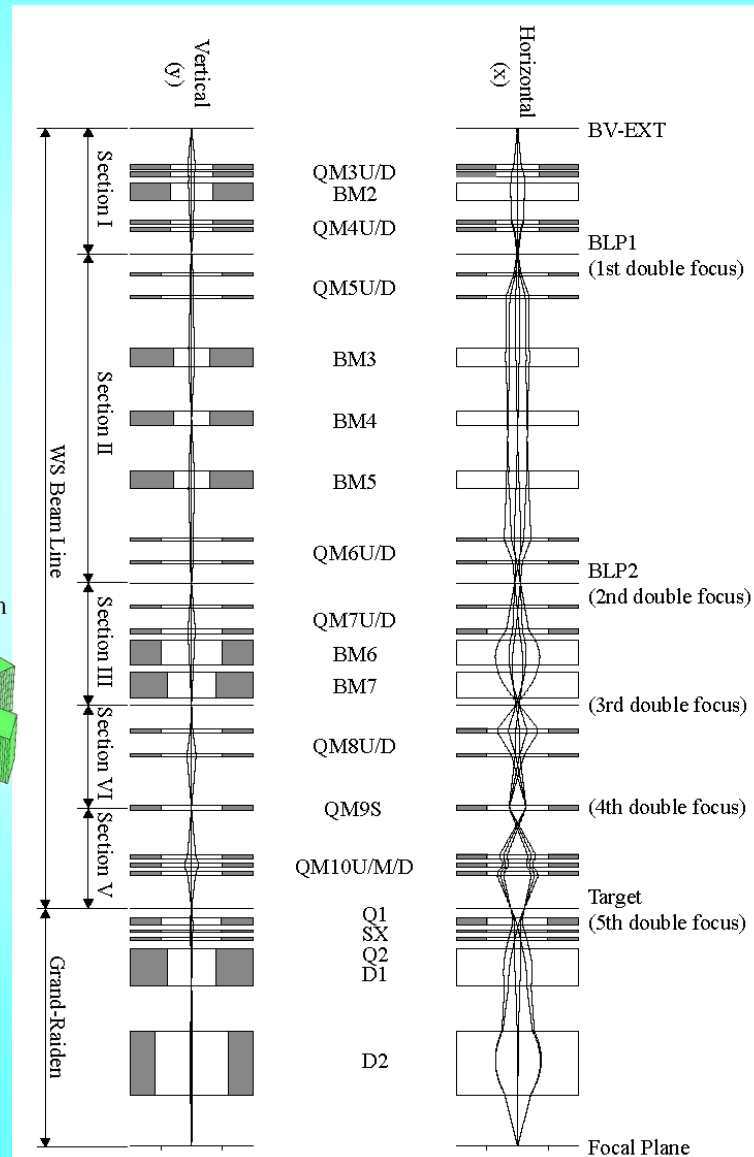
WS Beam Line and Two-Arm Spectrometers at RCNP

$x =$

$$x_0(s_{11}b_{11}T' + s_{12}b_{21}) - \theta_0(s_{11}b_{12}T' + s_{12}b_{22}) + \delta_0(s_{11}b_{16}T + s_{12}b_{26} + s_{16}C) - \Theta(s_{12} + s_{16}K)(1)$$

$\theta =$

$$x_0(s_{21}b_{11}T' + s_{22}b_{21}) - \theta_0(s_{21}b_{12}T' + s_{22}b_{22}) + \delta_0(s_{21}b_{16}T + s_{22}b_{26} + s_{26}C) - \Theta(s_{22} + s_{26}K)(2)$$



Double Arm Spectrometer

Grand Raiden Spectrometer

Resolution: 37,000

Momentum Byte: 1.05

Acceptance: 5.6 msr

Large Acceptance Spectrometer

Resolution: 6,000

Momentum Byte: 1.35

Acceptance: 20 msr

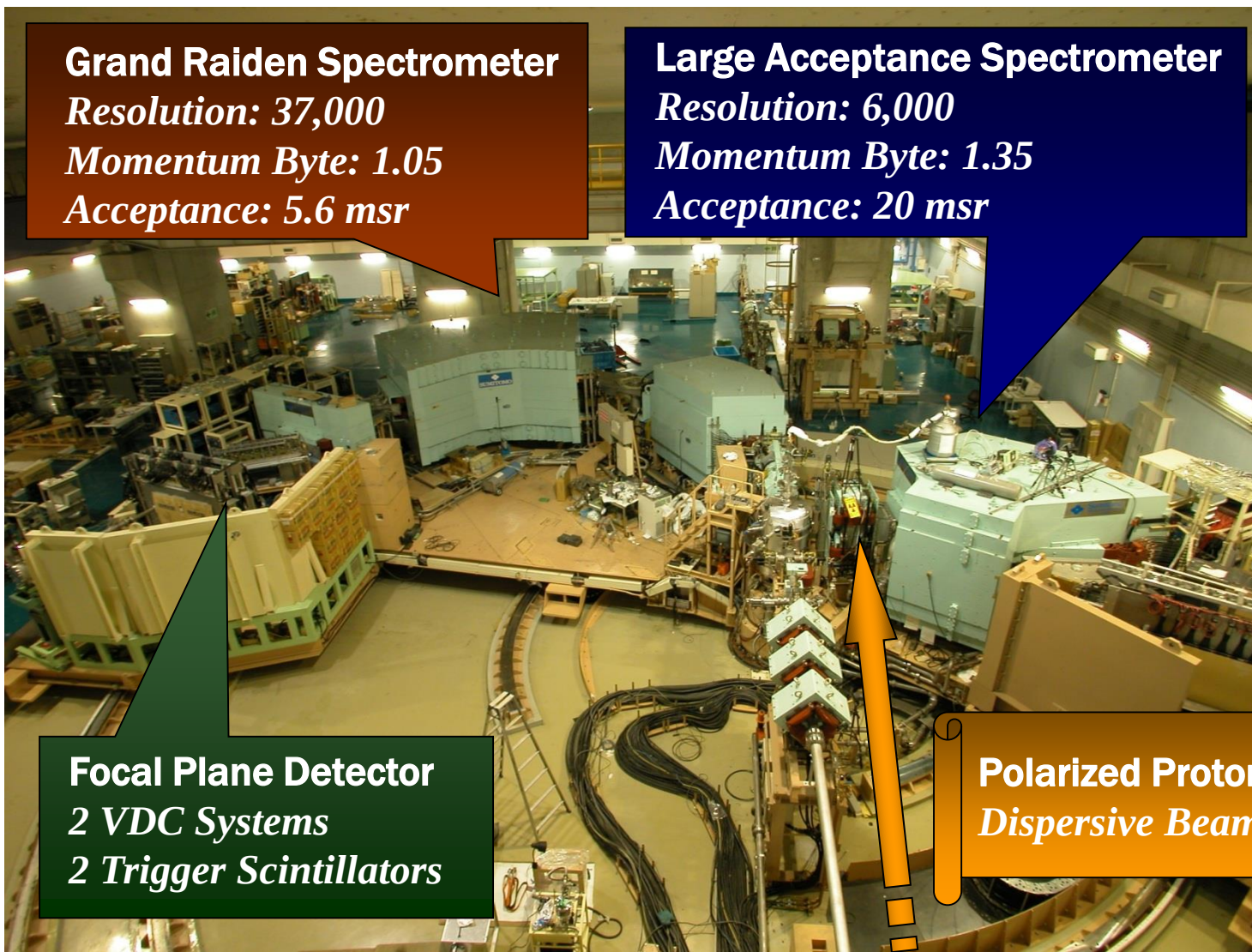
Focal Plane Detector

2 VDC Systems

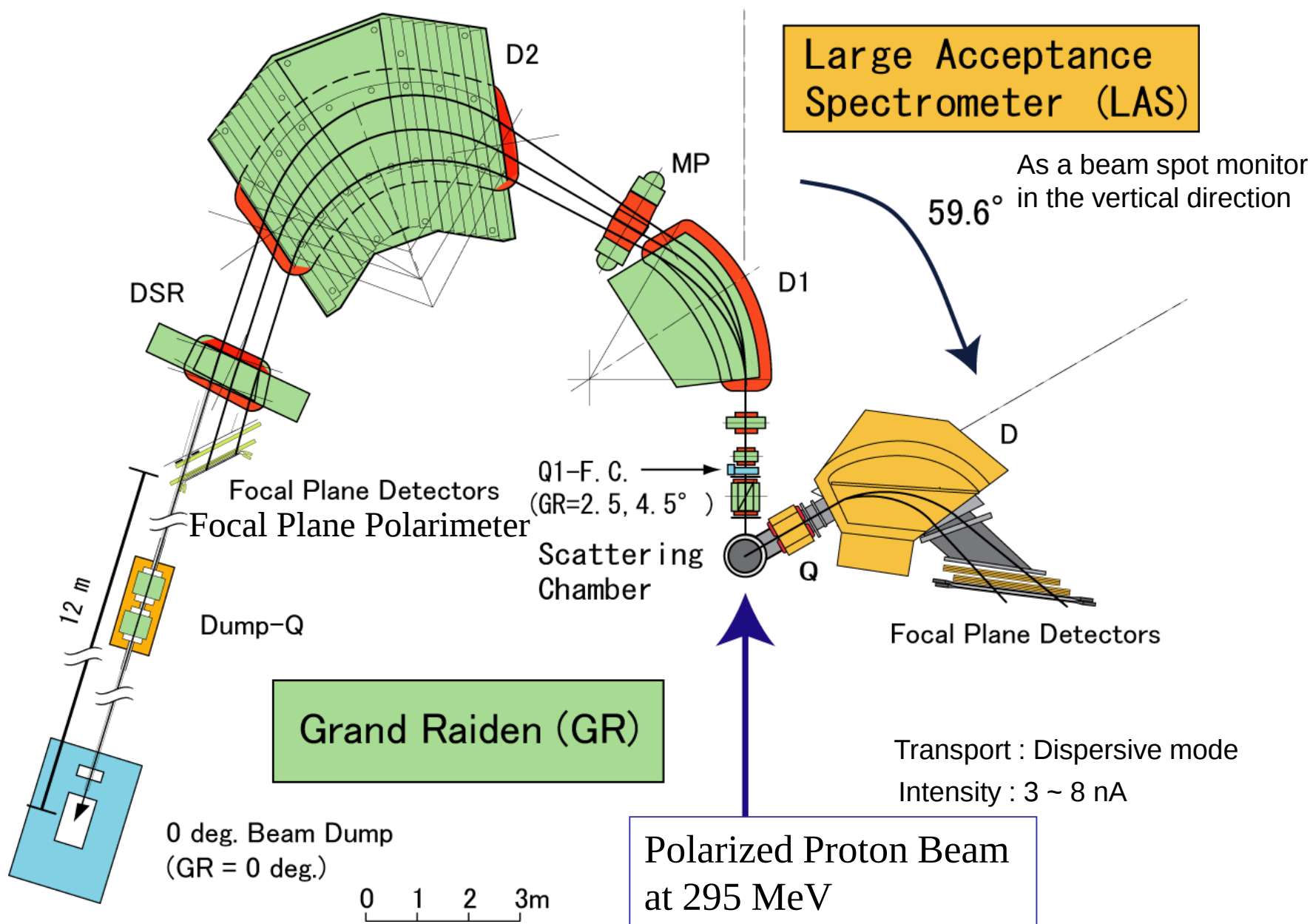
2 Trigger Scintillators

Polarized Protons

Dispersive Beam



Spectrometers in the 0-deg. experiment setup



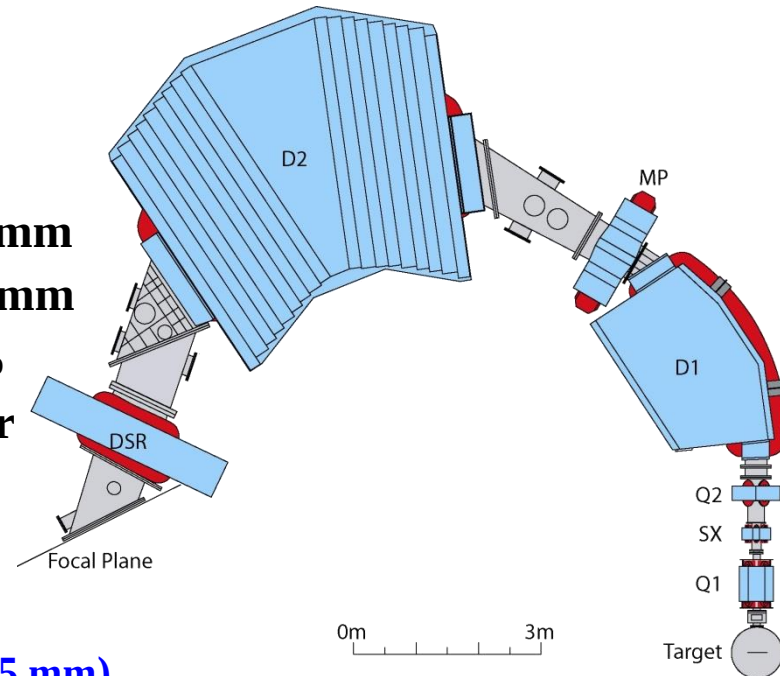
Grand-Raiden spectrometer at RCNP

- **Ion-optical properties of Grand-Raiden**
 - **Horizontal magnification:** $M_x = (x|x) = -0.417$
 - **Vertical magnification:** $M_y = (y|y) = 5.98$
 - **Momentum dispersion:** $D = (x|p) = 15,451 \text{ mm}$
 - **Momentum resolution:** $D/M_x = 37,076 \text{ mm}$
 - **Momentum acceptance:** $\pm 2.5\%$
 - **Solid angle:** $\sim 6 \text{ msr}$
- **Momentum/energy resolution of Grand-Raiden**

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{M_x}{D} x_0 = 2.70 \times 10^{-5} \quad \text{if } x_0 = 1 \text{ mm } (\pm 0.5 \text{ mm})$$

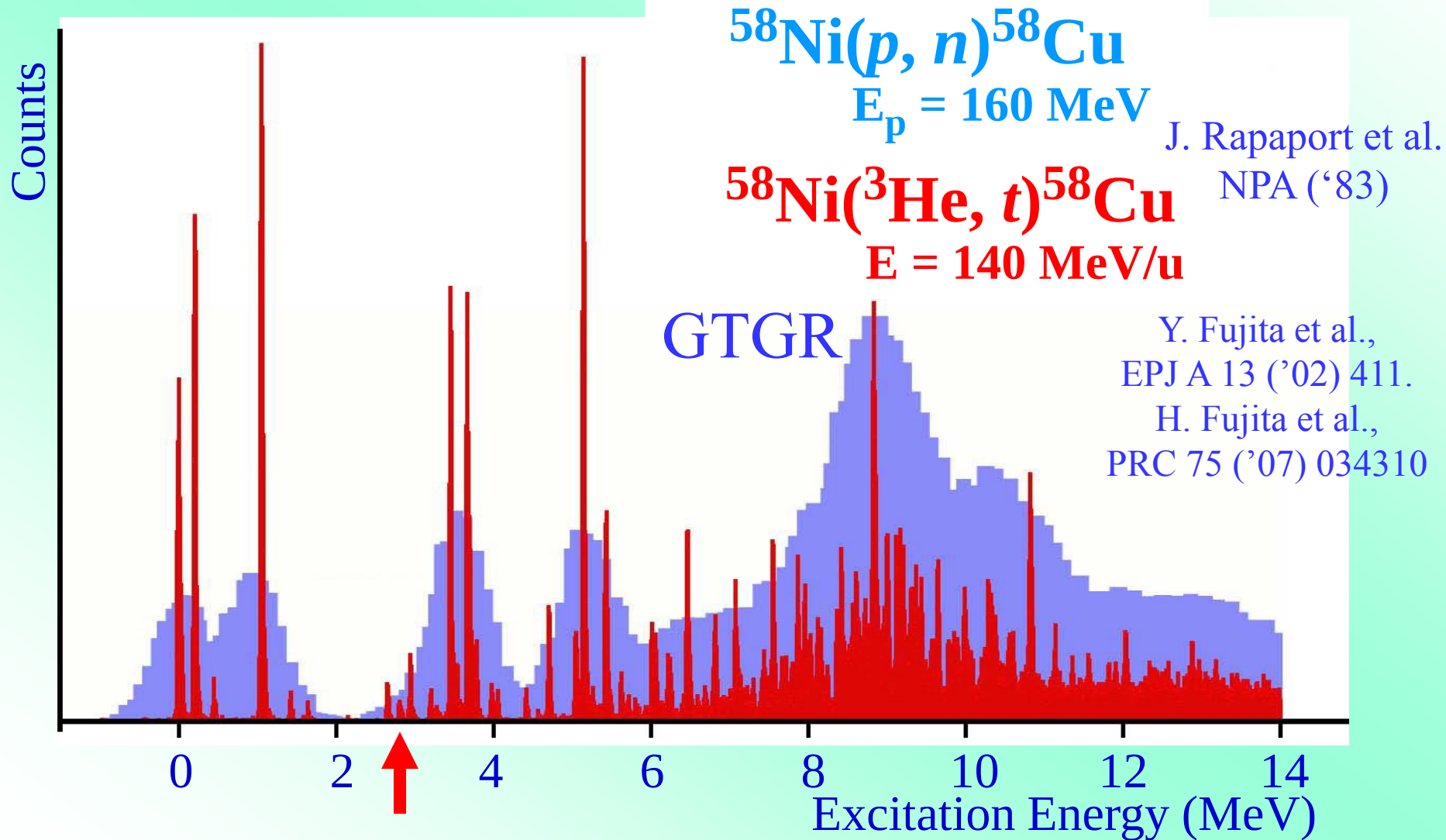
$$\frac{\Delta E}{E} = 1.70 \frac{\Delta p}{p} = 4.59 \times 10^{-5} \quad \text{if } E = 400 \text{ MeV}$$

- $\Delta E = 18 \text{ keV}$ if momentum spread of the beam is negligible



Comparison of (p, n) and ($^3\text{He}, t$) 0° spectra

Study of GT excitations (caused by $\sigma\tau$ operator) !



強い相互作用による ^{208}Pb の中性子スキン厚測定

陽子弾性散乱 at RCNP

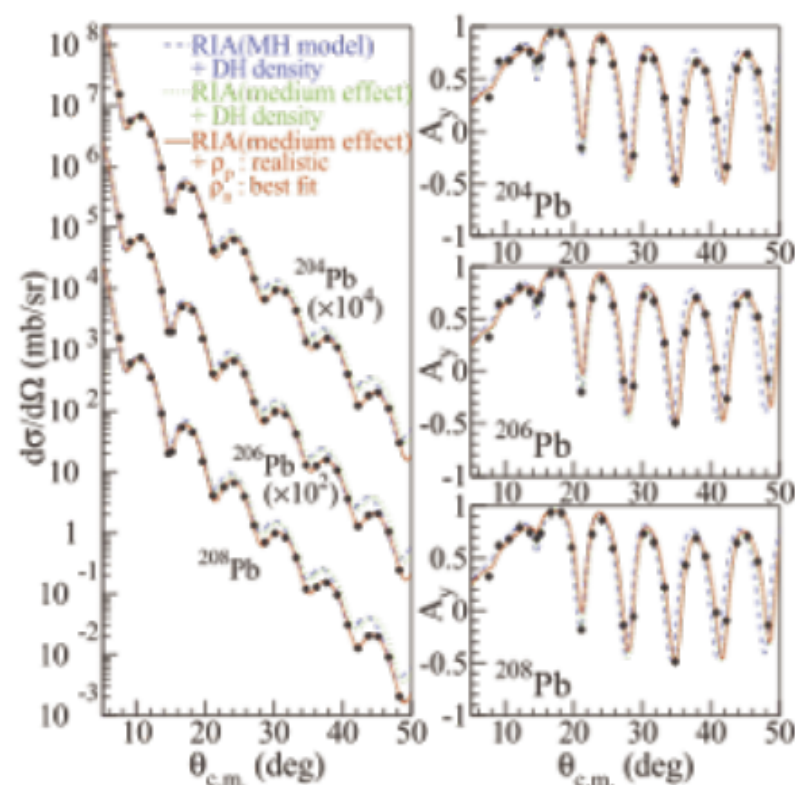
J.Zenihiro et al., PRC 82, 044611 (2010)

Polarized proton elastic scattering at 295 MeV (RCNP, Osaka University)

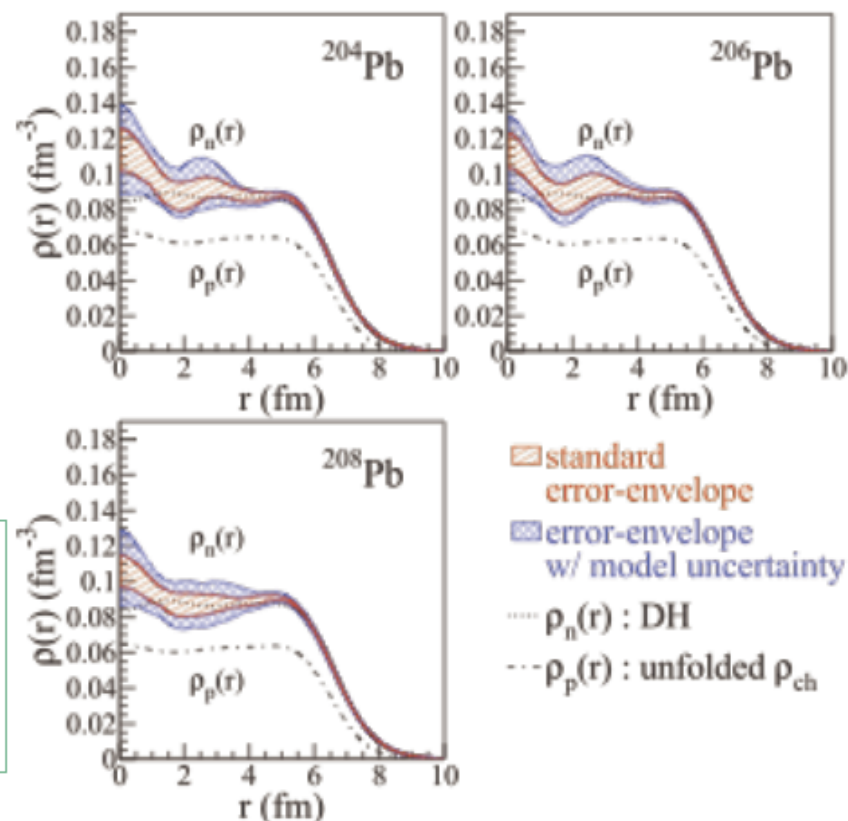
Analysis with relativistic impulse approximation (RIA), medium modification fixed with ^{58}Ni data

$ds/dW, A_y$

$r_n(r)$



RIA
+
Medium
Effect



$\delta r_n/r_n < 0.5\%$

2. これまでの次期計画検討状況

RCNPにおける将来計画立案の歩み(Ⅰ)

RCNP Workshop

「1.1 GeV 陽子、300MeV/u 軽重イオンによる研究検討」

1999 年 12 月 13 日 ~ 14 日

CONTENTS

1. Acceleration of GeV particles and TARN2
K. Hatanaka
2. RCNP でのイオンシンクロトロンの高性能化に向けての開発研究
K. Sato
3. Relativistic Nuclear Physics with GeV Protons
-Spin Observables-
H. Toki
4. Nuclear Medium Effects Studied
T. Noro
5. Probing Short Range Correlations
H. Sakaguchi
6. Non-Nucleonic Degrees of Freedom and In-Medium Effects in
Nuclei Detected by the Precise Beta Ray Angular Distributions and
Solid State Physics and Nuclear moments by use of the Polarized
Unstable Nuclear Probes
K. Matsuta
7. Meson Production in GeV Region
K. Tamura
8. Cluster Beam (C60 fullerene) Storage and
Heavy ion Beam Injection by Linac in TARN-II
T. Hattori

RCNPにおける将来計画立案の歩み(II)

2006年4月28日

大阪大学 核物理研究センター
センター長
土岐 博 殿

2004年8月の核物理研究センター研究計画検討専門委員会において将来計画ワーキンググループ（大西 明 委員長）に付託された審議事項を答申いたします。

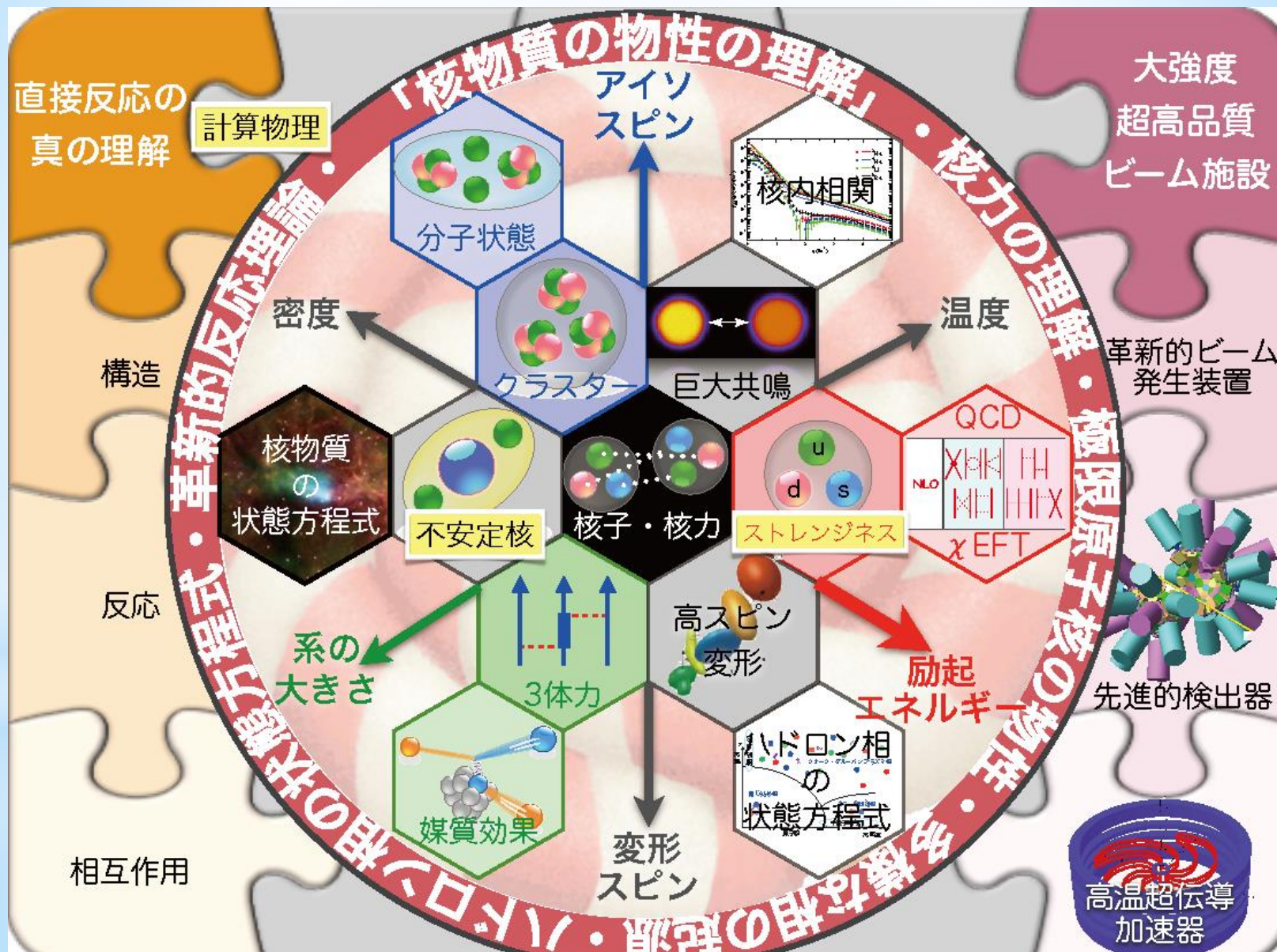
当ワーキンググループは、核物理において日本および世界のセンターとして重要な役割を果たしてきた大阪大学核物理研究センター（RCNP）の将来像を議論するため、2004年2月に開催されたRCNP 研究計画検討専門委員会（研計委）において同委員会が主体となってこれを立ち上げることが決定されました。さらに同年8月の委員会においてRCNP 内部からのメンバーを半数としたワーキンググループが発足し、約1年半にわたって議論を重ねていただきました。その間、研計委においてもワーキンググループの途中経過報告を受け、研計委の委員による質疑や批判に対してさらにワーキンググループで議論を進めようというプロセスを繰り返しました。その結果として、「Photon beam と Hadron beamを活用し、原子核構成要素の実体を明らかにすることによって、クォーク多体系としてのハドロン物理、ハドロン・核子多体系としての核物理を追求する」という最終提言に至りました。本研計委はこの提言を尊重し、これを基礎としてより具体的なRCNP の将来像が描かれることを希望します。本研計委としましても、今年度中にはRCNPの将来計画に関するワークショップ等を開催し、将来計画に対する機運を、RCNP・研計委が協力して盛り上げていくことを提案させていただきたいと思います。

2006年度 RCNP 研究計画検討専門委員会、委員長
中村隆司

RCNPにおける将来計画立案の歩み(III)

- ・2009年 RCNP内外の有志により将来計画検討開始
 - …不安定核蓄積リングやFFAGなどを検討
 - LuminosityやQualityの点で断念(2011年)
- ・2010年 「日本の核物理の将来」(核物理委員会主導)の検討がスタート
- ・2011年 研計委の諮問による「RCNP将来計画検討会」を立ち上げ、将来計画の立案を再開
 - …「日本の核物理の将来」精密核物理WGと連携しながら検討を深める
 - 2012年に研計委へ答申
 - 同年、精密核物理WGから核物理委員会・将来計画小委員会へ提出した報告書の中で位置づけ
- ・2014年 サイクロトロン施設高度化・技術諮問委員会
- ・2015年 RCNPサイクロトロン施設将来計画策定委員会

*精密核物理分野の将来図



* 新たな“精密核物理”@RCNPの展開

● 将来目標

● 核物質の物性の理解

- 「核物質」＝核子（陽子・中性子）を構成要素とする系全体
 - 少数核子系～原子核～無限系である狭義の核物質を統一的に扱う
- 「物性の理解」＝構造・反応・相互作用を統合的に扱う
 - 原子核という有限量子多体系に現れる多彩な現象を統一的に理解する

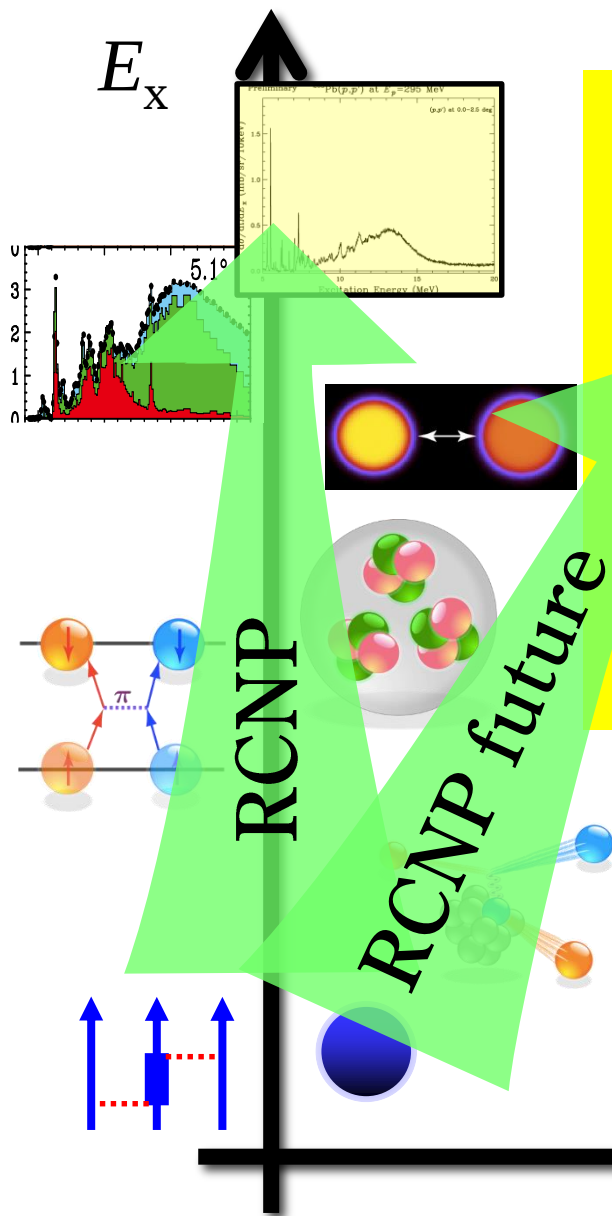
● 目標達成のための主要なテーマ5つ

- 核力の理解
- 極限原子核の物性の理解
- 原子核の多彩な相の起源の理解
- ハドロン相の状態方程式の理解
- 革新的反応理論の確立

- ✧ 総体として原子核の統一理論の構築を通して、「核物質の物性の理解」を目指す
- ✧ 以下の分野・物理とも深い関わり
 - 不安定核
 - ハドロン
 - 宇宙物理
 - 物性物理

上記3つをRCNPサイクロトロン施設の将来計画の柱とする

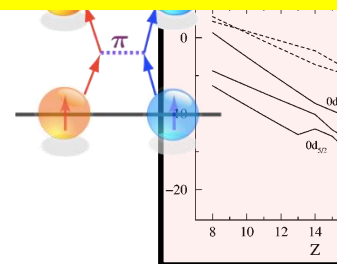
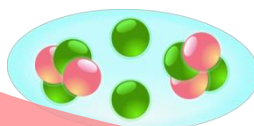
Direction of Nuclear Physics @ RCNP



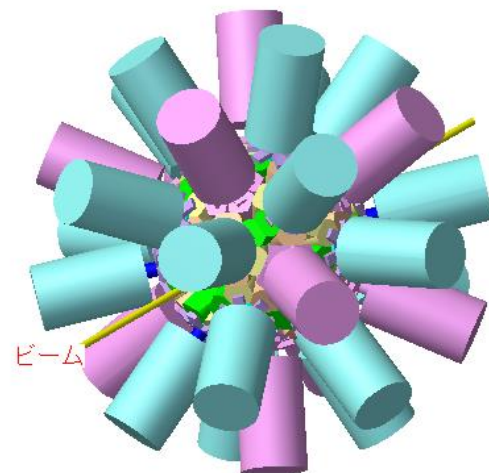
- Structure and Reaction of Unstable Nucleus
high resolution
wide range of excited states
 Not isospin frontier
 cf. Most of the RI beam facility
 → isospin frontier,
 but mostly only low-lying states.

with

**Grand RAIDEN + Unstable Target and
 High quality separator + Ge tracking array**



RIBF/FRIB/FAIR



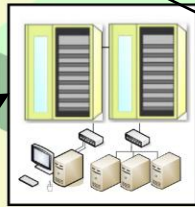
サイクロトロンカスケード装置

高周波加速系

リングサイクロトロン

高温超伝導磁石を採用し
省電力化(低炭素化)
(世界初の技術)

制御系



入射ビームライン

分離セクター型
入射サイクロトロ

出射ビームライン

- ・ ビームを一桁以上増強
- ・ 広エネルギー: 10-400MeV
- ・ 豊富イオン種: 陽子-ゼノン
- ・ 基礎研究: 原子核、素粒子
- ・ 関連研究: 医学、化学、工学
イメージング、半導体
- ・ 加速器科学教育

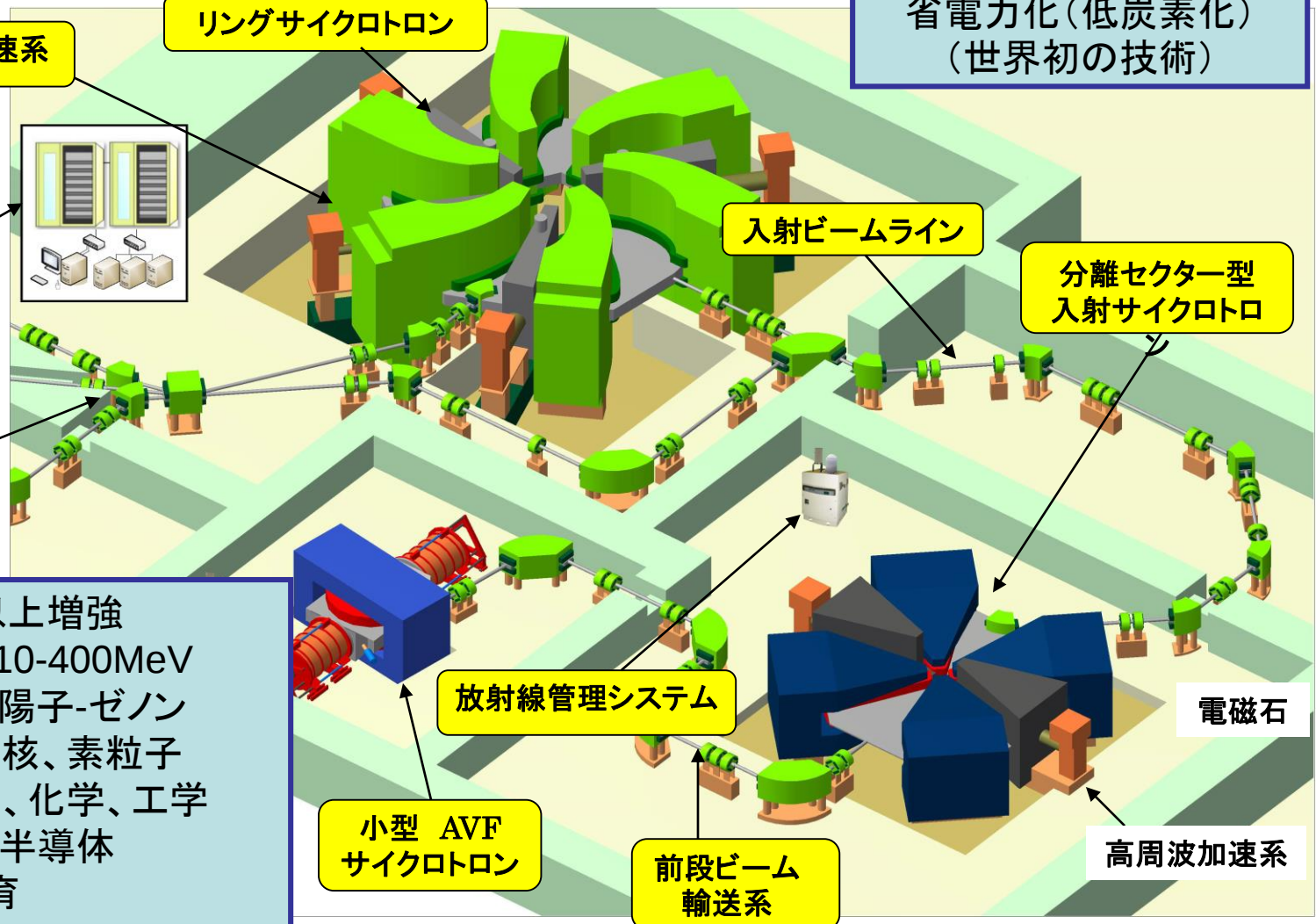
放射線管理システム

小型 AVF
サイクロトロン

前段ビーム
輸送系

電磁石

高周波加速系





サイクロトロン施設の位置付けと今後の展開

- RCNPサイクロトロン施設は精密核物理の一大研究拠点
 - ・全国共同利用研究施設(1976年より)
 - ・サブアトムック科学研究拠点(2010年より)
 - ・高品質軽イオンビームを供給するサイクロトロン
 - ・超高分解能実験を可能にするユニークな実験装置
 - ・原子核物理学のみならず、医学、放射化学、産業応用などにも利用拡大
 - ・二次粒子(中性子、muon等)やRIの利用ニーズが増大



学術会議マスタープラン「大型研究計画」への提案

サブアトムック 科学研究 の促進構想

- | | | |
|--------------|---|---------|
| ・高運動量ビームライン | → | J-PARC |
| ・トラッキングGeアレイ | → | RIBF |
| ・MuSIC | → | 中間子分野 |
| ・CANDLES | → | KamLAND |
| ・LEPS2 | → | 光科学 |

3. 次期計画の加速器は・・・

2015年 サイクロトロン施設将来計画策定委員会

●方向性を見定める課題について検討を開始・・・

- * 1GeV Machineができれば何ができるか？
- * 分解能が1keVになったら何ができるか？
- * HDの物理的意義
- * Brilliantの物理的意義
- * 軽い重イオンビームの整備
- * ミューオンビーム

* PSI Ring Cyclotron for ADS

Extrapolation at higher currents and energies

$10 \text{ mA at } 1 \text{ GeV} = 10 \text{ MWatt}$
 Efficiency of conversion from AC to beam $\approx 50 \%$
 Injection energy 120 MeV

Potential of Cyclotron based Accelerators for Energy Production and Transmutation

Th. Staimbach, S. Adam, IL.R. Fitze, W. Joho and U. Schryber
 Accelerator Division, Paul Scherrer Institute
 CH-5234 Villigen-PSI, Switzerland

Abstract. PSI operates a 590 MeV-cyclotron facility for high intensity proton beams for the production of intense beams of pions and muons. The facility, commissioned in 1974, has been partially upgraded and is now operated routinely at a beam current of 1 mA, which corresponds to a beam power of 0.6 MW. At this current, the beam losses in the cyclotron are about 0.02%. By the end of 1995 we expect to have 1.5 mA of protons. Extensive theoretical investigations on beam current limitations in isochronous cyclotrons were undertaken. They show that the longitudinal space charge effects dominate. Based on our experience we present a preliminary design of a cyclotron scheme that could produce a 10 MW beam as a driver for an "energy amplifier" as proposed by C. Rubbia and his collaborators. The expected efficiency for the conversion of AC into beam power would be about 50% (for the RF-systems only). The beam losses in the cyclotron are expected to be a few μA , leading to a tolerable activation level.

A PSI study

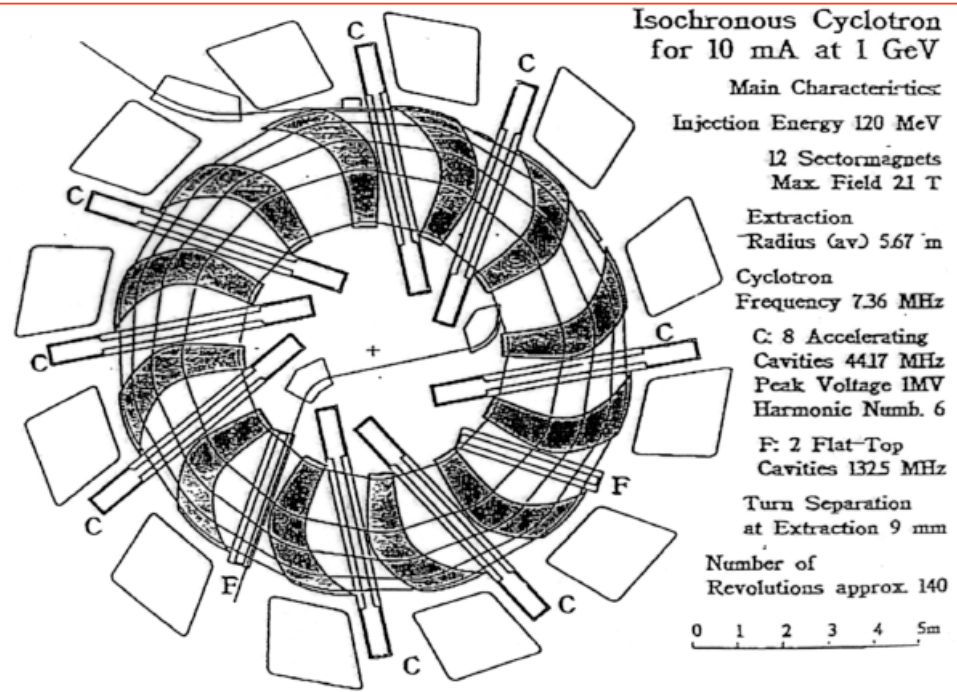


Fig. 4. Layout of the proposed high power cyclotron.

Maximum fission driving power: 2.4 GWth for $k_{\text{eff}} = 0.99$

* リングサイクロトロンの高エネルギー化

- K1000リングサイクロトロンに更新 -



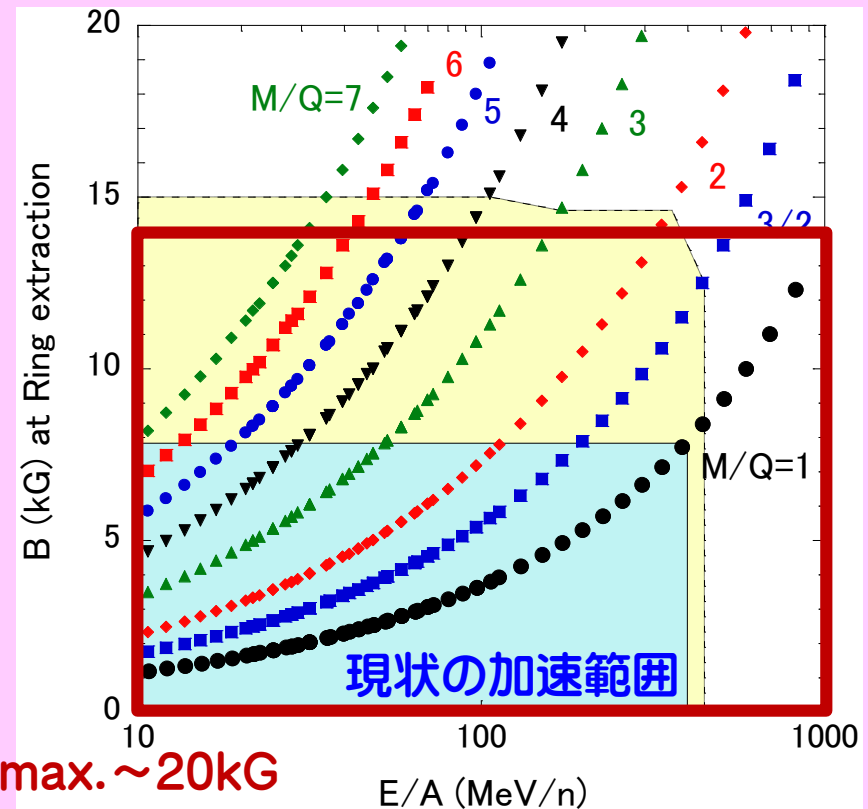
K400 Ring Cyclotron

【現在の性能】

- ・軽イオン ($M/Q \leq 3$) 加速が主体
 - proton ≤ 420 MeV
 - $D^+, {}^4\text{He}^{2+}$ ≤ 100 MeV/n
 - ${}^3\text{He}^{2+}$ ≤ 170 MeV/n
 - Heavy Ion $\leq 400 \times (Q/A)^2$
- ・RF周波数 30~52 MHz
- ・加速ハーモニクス 6, 10, 12, 18
- ・最大平均磁場 8 kG(max.17.5)

● 高品質のMW級軽イオン加速に加えて、重イオンも高エネルギー化

- ・高温超電導電磁石 & ハイパワーRF
- ・陽子 ~ 1000 MeV
- ・重イオン ~ 300 MeV/n



1GeV リング・サイクロトロンのパラメータ

- ・引出半径 : 500 cm ←大きく・・・でもコンパクトに
- ・最大平均磁場 : 11.3 (kG) → ~ 2.3 (T)@高温超伝導電磁石
- ・K値 : 1 GeV
- ・加速ハーモニクス : 6
- ・加速周波数 : 50 (MHz)
- ・ビーム強度 : $\sim 100 \mu\text{A}$ (・・・できれば $\sim 1\text{mA}$)

Ion	Energy (MeV)	B_{av} (kG) @500cm	B_0 (kG) @200cm	f_{RF} (MHz)	h
proton	200	4.3	3.64	32.4	6
	400	6.39	4.67	40.9	6
	600	8.15	5.23	45.4	6
	800	9.76	5.60	48.2	6
	1000	11.3	5.85	50.1	6
	1300	13.6	6.10	52	6

* 超高品質高輝度リングサイクロトロン(K1000)

●陽子ビーム高強度化 & 高品質化のための開発課題

- ・大強度陽子源
 - 高加速電圧化、低エミッタンス化、高輝度化
- ・サイクロトロン主電磁石
 - 高温超電導コイルの大型化・高強度化・高安定化
 - 冷却水 & 空調システムの精密制御による超高安定磁場分布形成
- ・RF系
 - 高加速電圧の最大化によるターンセパレーション拡大と空間電荷効果対策
 - 高調波加速による位相アクセプタンス拡大とエネルギー幅の最小化
- ・入射・引出領域
 - 静電・磁気チャンネル等の機器のアクセプタンス最大化による透過効率向上

まとめ

これまでの将来計画の検討を踏まえ・・・

●現在、RCNPサイクロtron施設将来計画策定委員会
において次期計画を検討中

* 1GeV加速器をつくるために・・・

→ 高強度1GeVリングサイクロtronの検討

高強度入射器、高輝度イオン源、・・・

重イオン加速も(可変エネルギー)・・・

* 分解能を1keVにするために・・・

→ FT加速の強化と高安定化