

RCNPにおけるビーム強度の増強と 中性子利用

K. Hatanaka, M. Fukuda, T. Yorita, H. Ueda, T. Saito,
H. Tamura, K. Nagayama, M. Kibayashi, Y. Yasuda,
H. Yamamoto, K. Kamakura, N. Hamatani and
S. Morinobu,

Sumitomo Accelerator Service

Research Center for Nuclear Physics,
Osaka University

Outline

1. はじめに
2. ビーム強度増強に向けた開発
3. 新入射器の提案（概念設計）
4. 中性子（ビーム）利用

RI beam separator

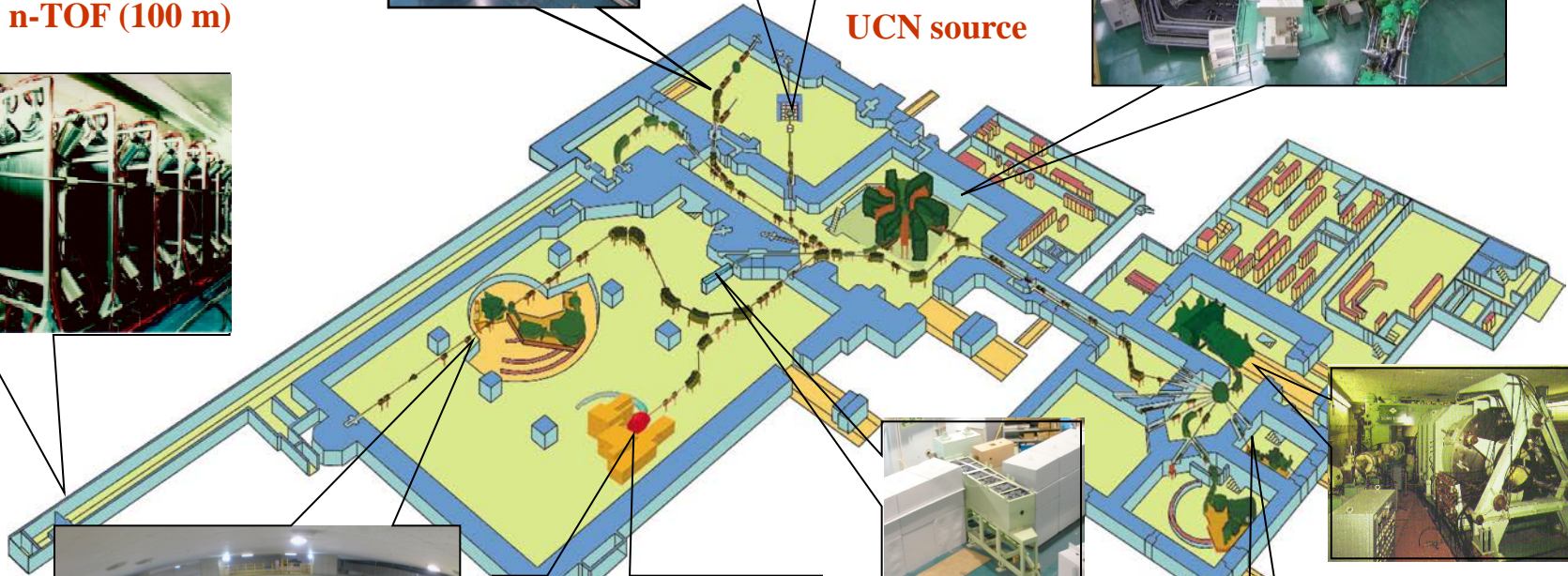


K400 ring cyclotron



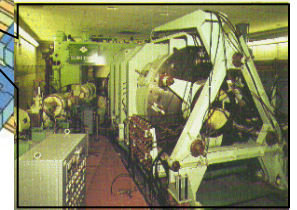
UCN source

n-TOF (100 m)

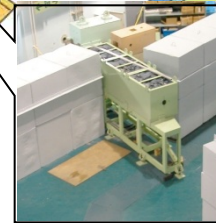


K140 AVF cyclotron

**p ~ Xe
Pol. p & d**



White neutron source



**Double arm spectrometer
(Grand Raiden & LAS)**



MUSIC

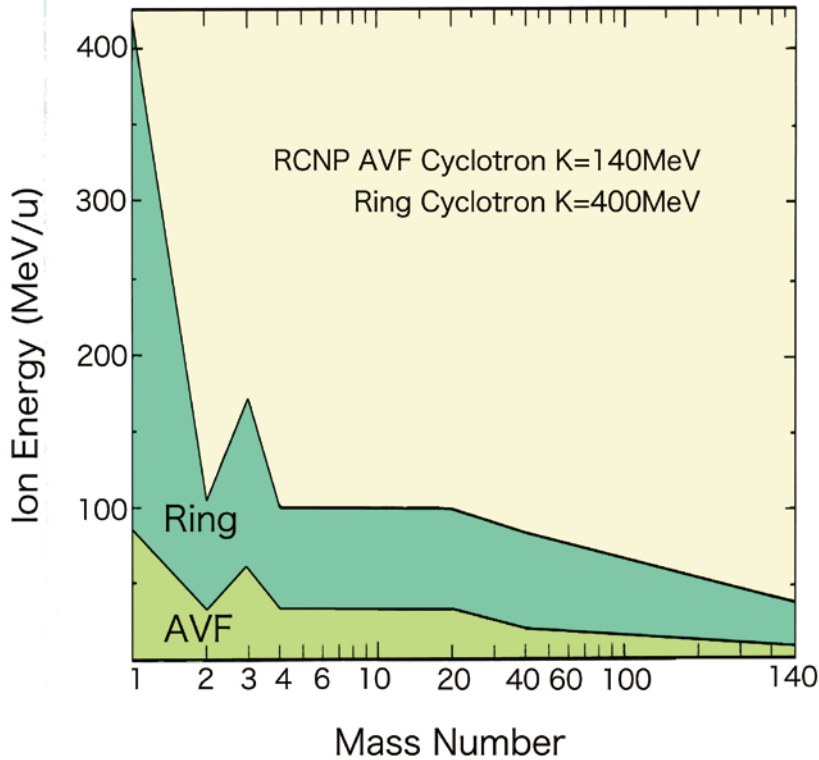


RCNP Cyclotron Facility

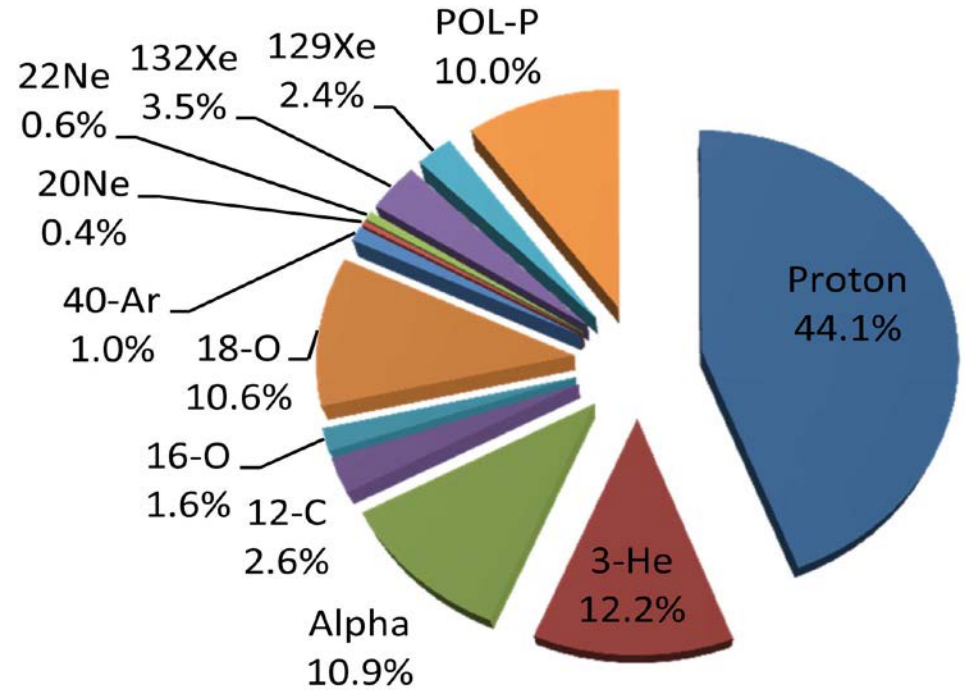
RI production



RCNP Cyclotrons

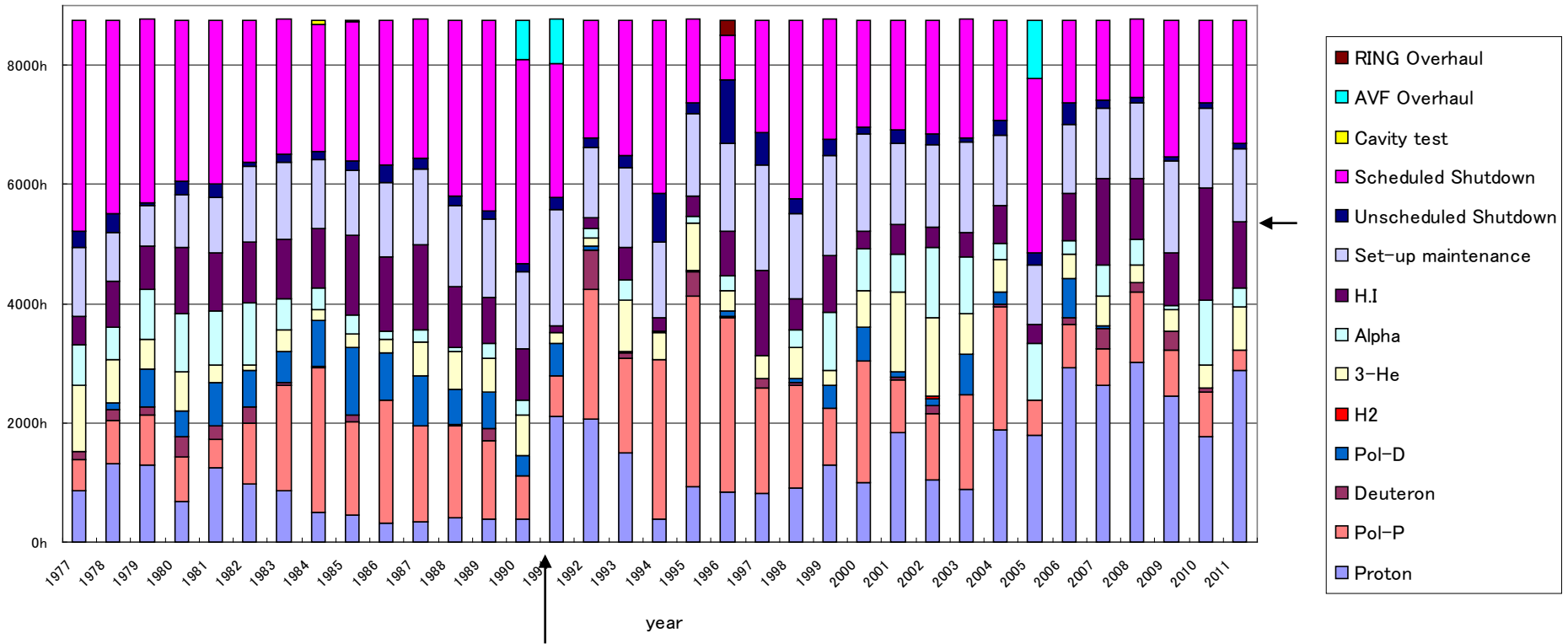


Energy of accelerated ions



Ion species accelerated in 2011

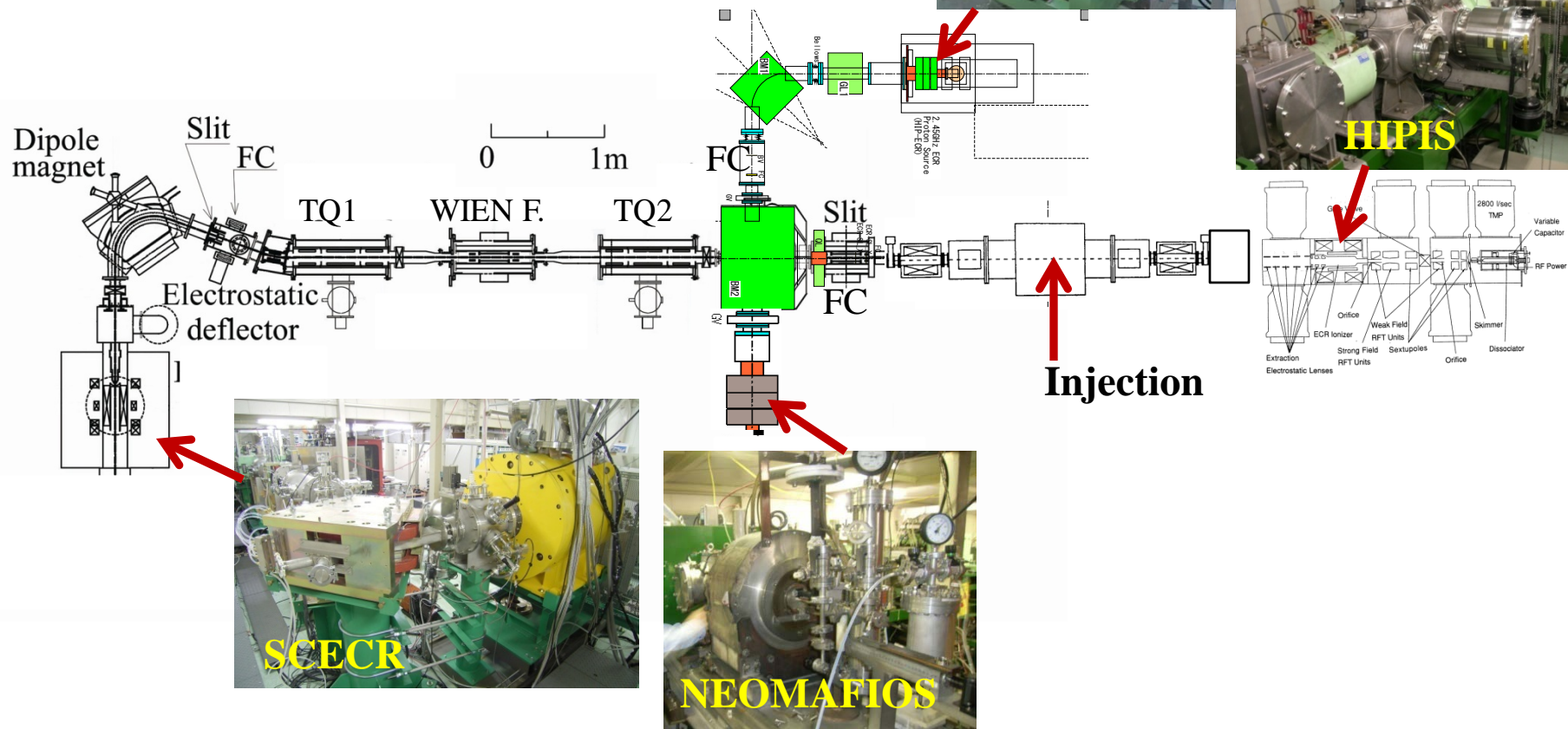
Operating statistics



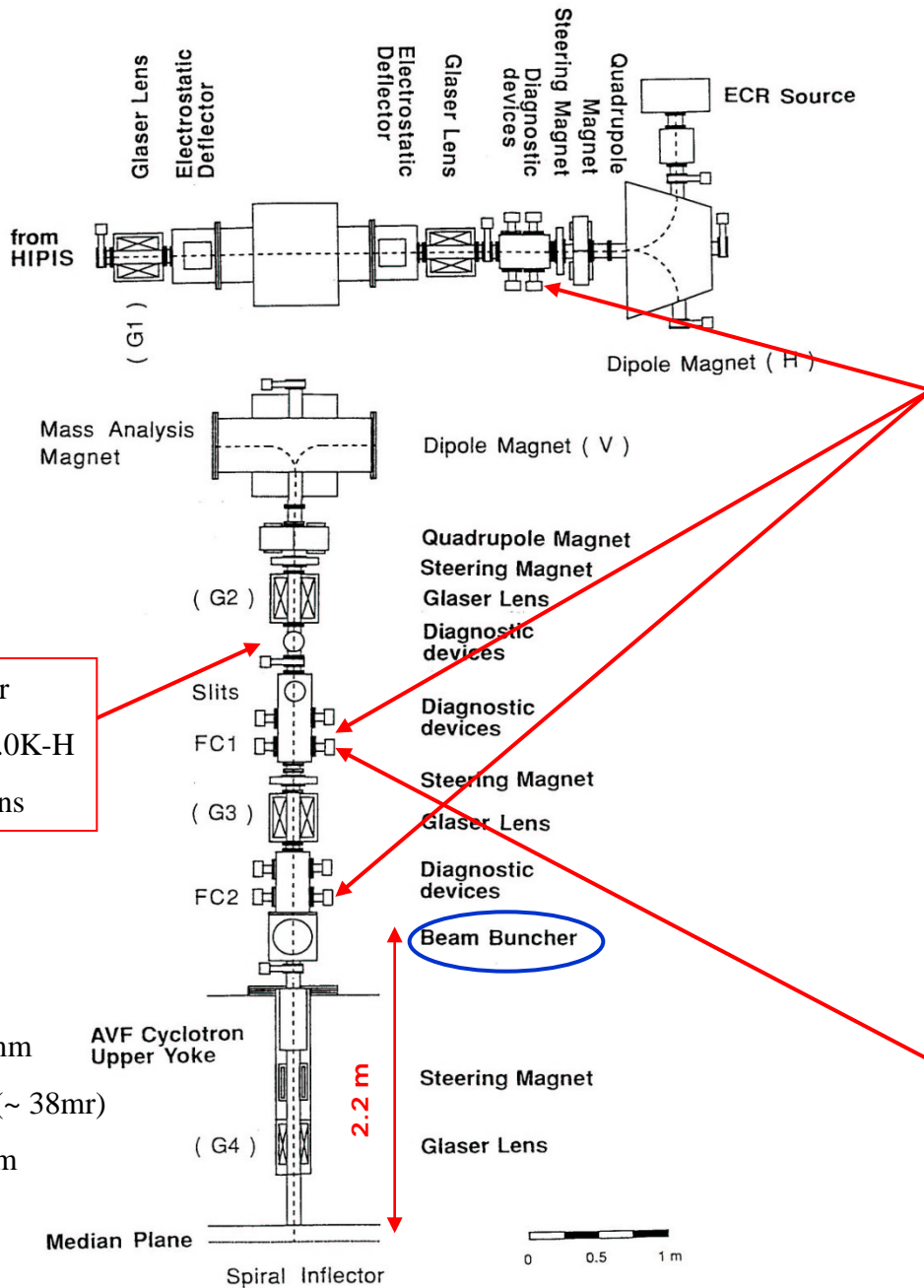
Ring Cyclotron

RCNP Ion Source Complex

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



Axial injection line



Chopper
DEI, GRX-3.0K-H
 $t_r, t_f < 45\text{ns}$

G4 ~ M.P.: ~750mm

G4 I.D. : $\phi 57.3$ (~ 38mr)

Inflector gap: 6mm

ビューアー



iris 型 diaphragm



1. 高輝度陽子源の開発

● 主な仕様と高輝度化に向けた改良点

- ・磁場：リング状に配置した3連の永久磁石により生成
- ・マイクロ波： 2.45 GHz ECR陽子源
(従来) 200 W → 2 kWに増強
電源と導波管を更新済み
- ・引き出し電極：4連電極配置による加速・減速電場形成
プラズマ電極位置の見直し → ECRゾーン側に19mm接近
電極間の絶縁性向上 → 電極支持板の間隔を拡大
- ・プラズマチェンバー：内壁に沿ってアルミ製円筒を挿入
マイクロ波導入部側とプラズマ電極側にBN板を設置
→ プラズマチェンバーの導入部を改良予定

プラズマ電極位置の見直し

● 磁場分布とプラズマ電極の位置

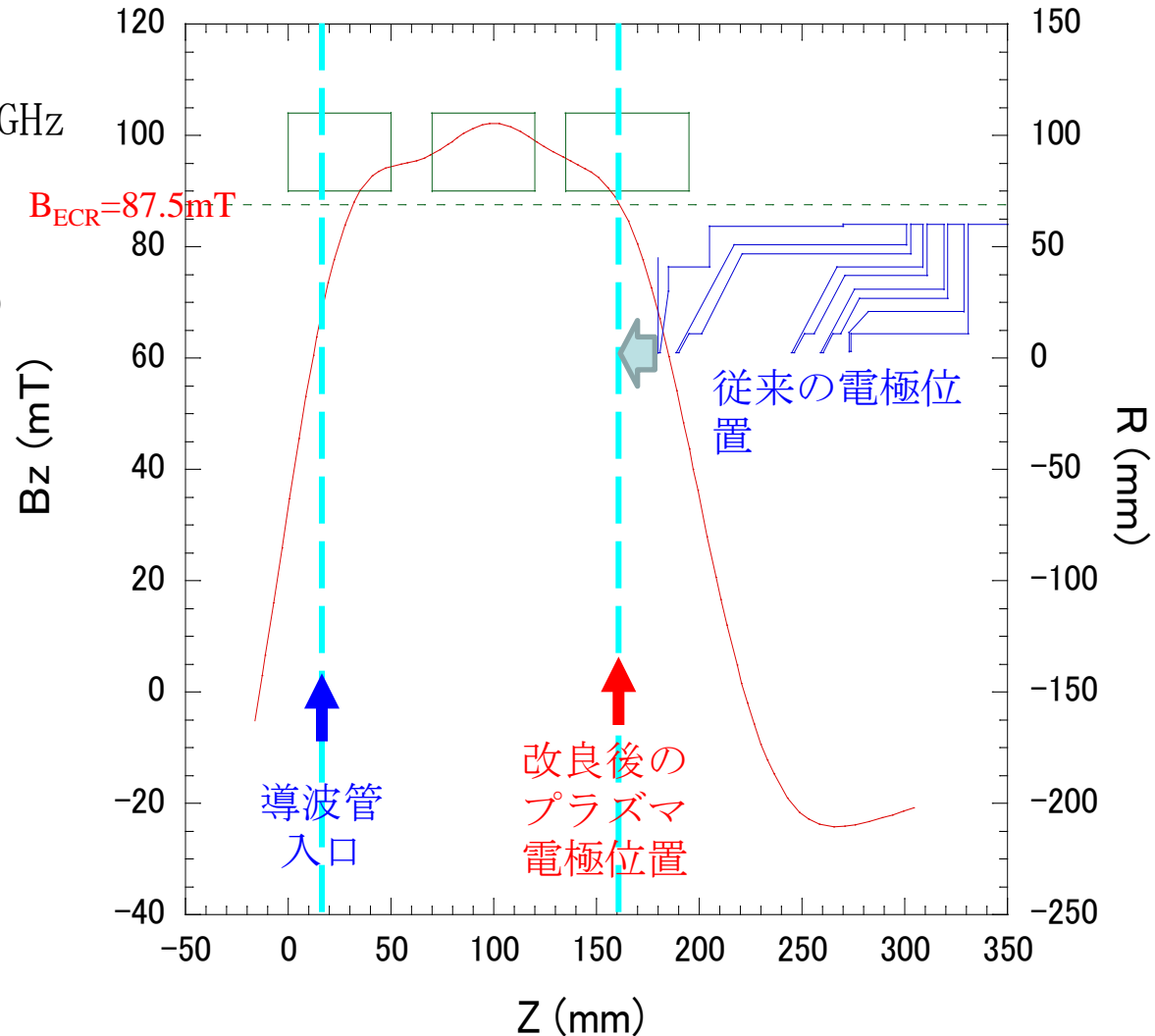
・ECR磁場 875G

@マイクロ波周波数 2.45 GHz

・プラズマ電極の位置

$B_z \sim 875G$ の位置に合わせる

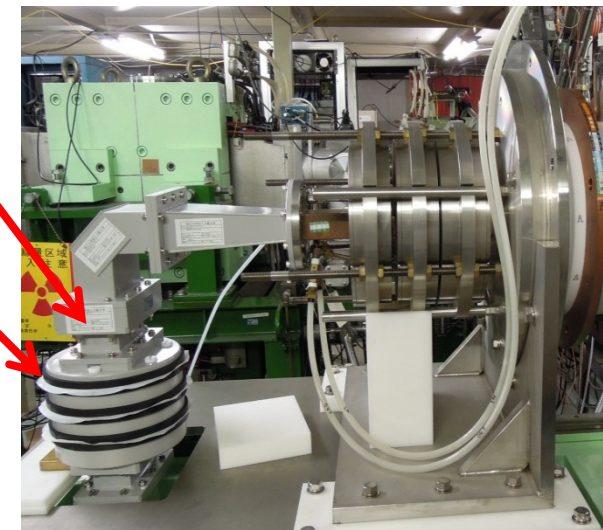
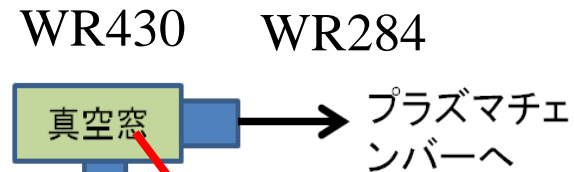
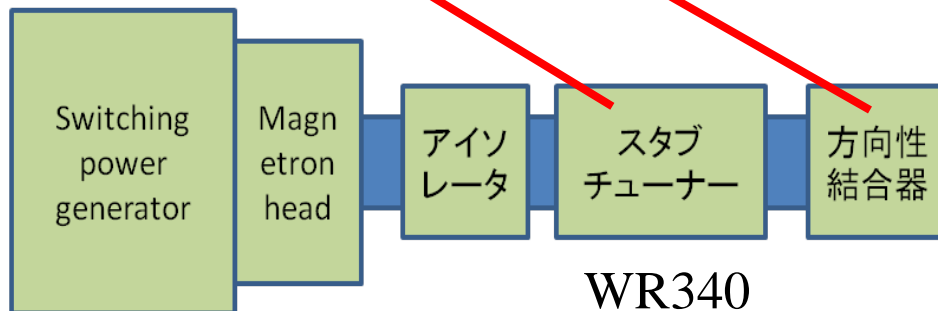
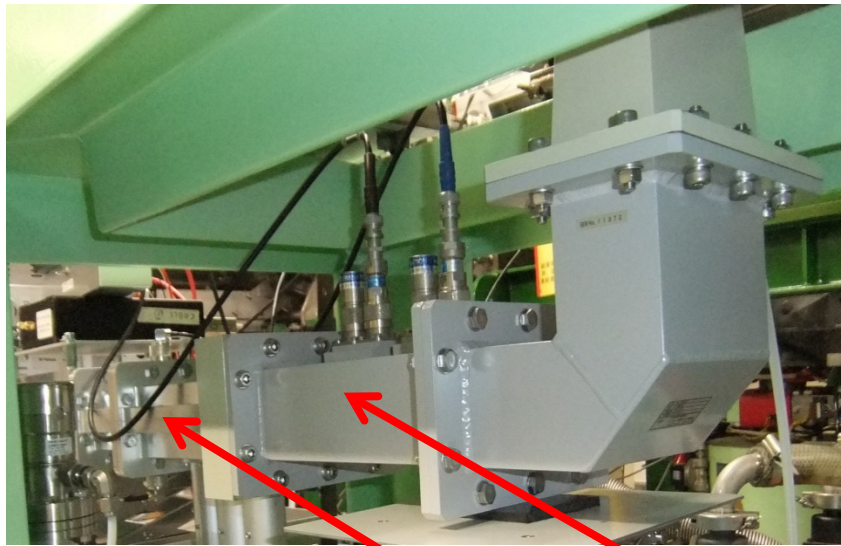
※従来は19 mm下流



マイクロ波パワーの増強（Ⅱ）

● 導波管の更新

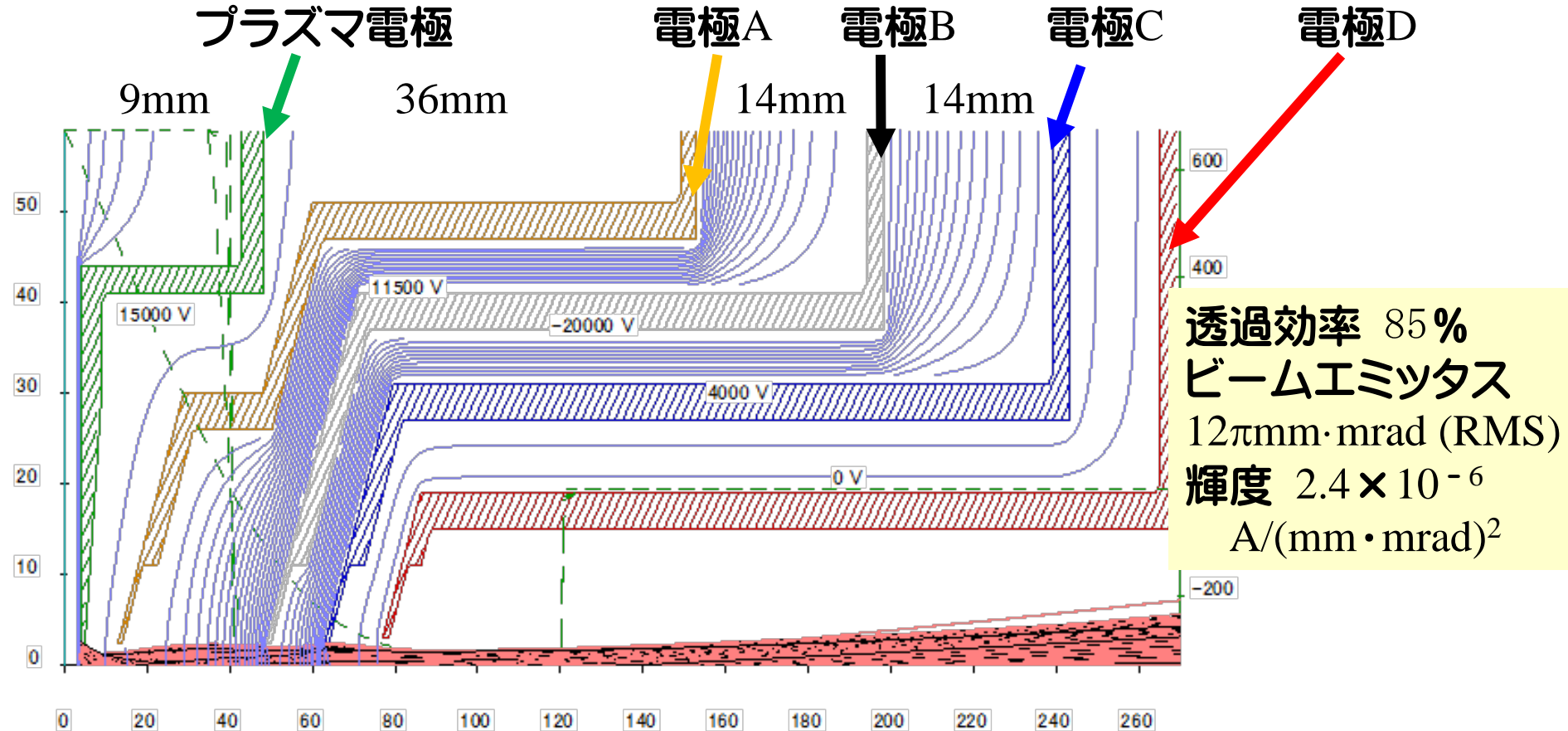
- ・アイソレータ、スタブチューナー、方向性結合器などを更新
- ・真空窓を水冷化



引き出し電極の改良（Ⅱ）

● 引出電極間の距離を最適化

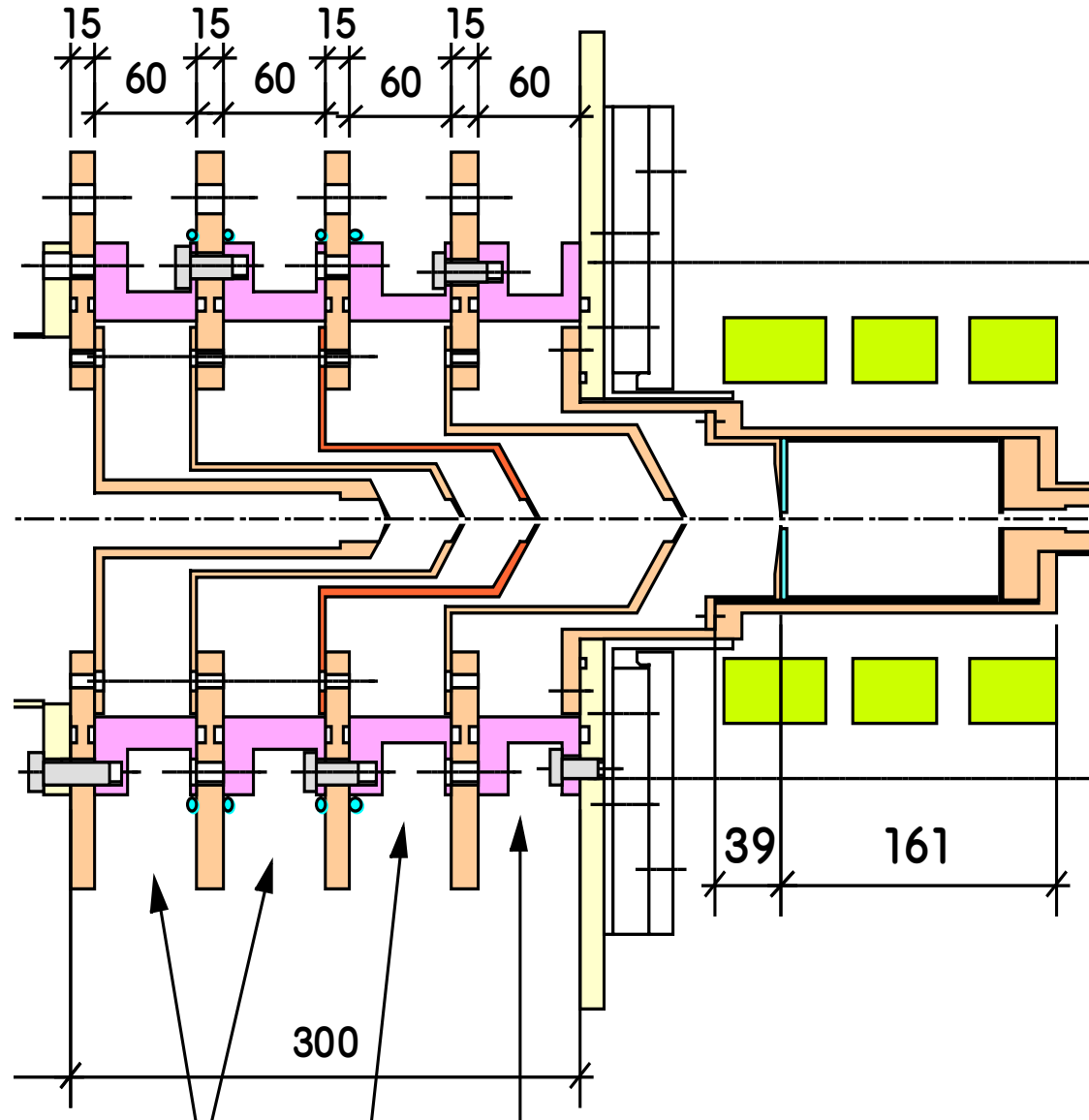
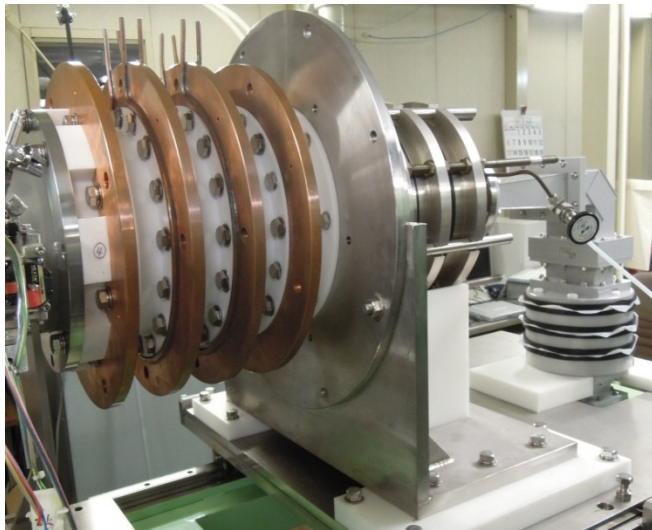
- ・IGUNによる引出ビーム軌道計算結果を基に引出電極の配置を見直し
- ・電極間の距離



引き出し電極の改良（I）

● 引出電極の改造

- ・引出電極（A電極～D電極）の位置を上流側に19mm移動
- ・放熱板の間隔を30mmから60mmに拡大し、絶縁碍子の形状を変更して大気中での沿面放電を回避



ビームエミッタンス@LEBT

【測定条件】

- ・真空度 $2.6 \times 10^{-3} \text{Pa}$ @引出電極
- ・マイクロ波出力 800W
- ・プラズマ電極 +15kV、電極A +5.7kV、電極B -7kV、電極C & D GND
- ・分析後の陽子ビーム電流値 $\sim 380 \mu\text{A}$
- ・ECRスリット

水平 & 鉛直方向 $\pm 3\text{mm}$

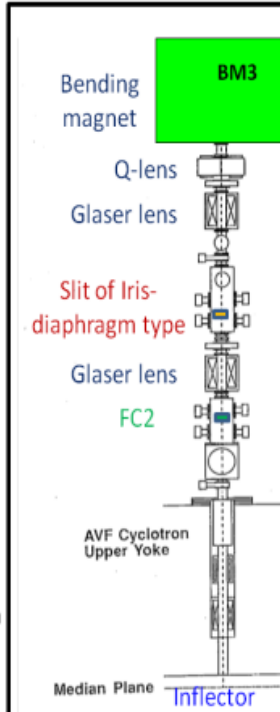
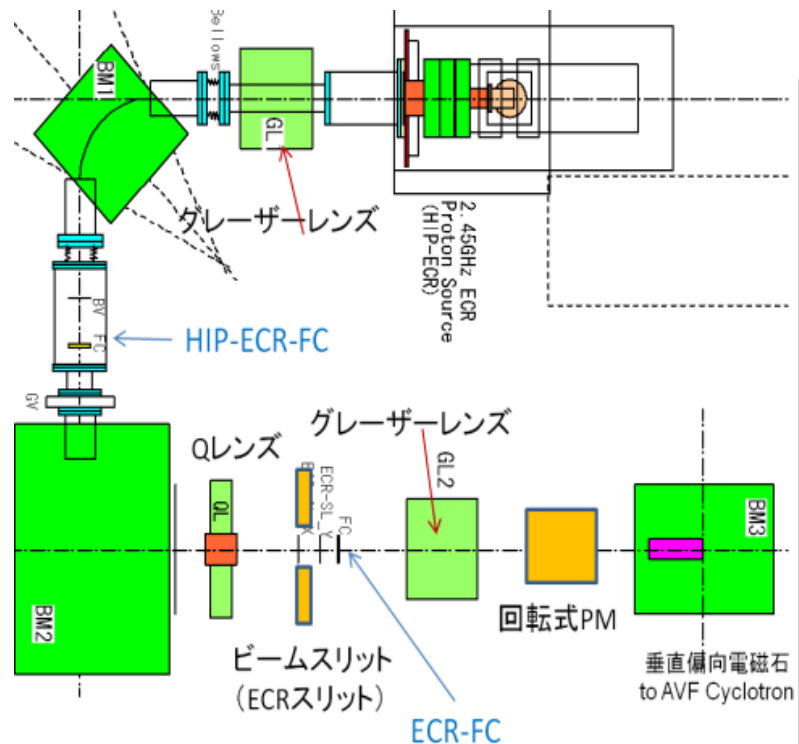
・エミッタンス

$$\varepsilon_x \sim 190 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$$

(規格化エミッタンス
 $\sim 1.1 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$)

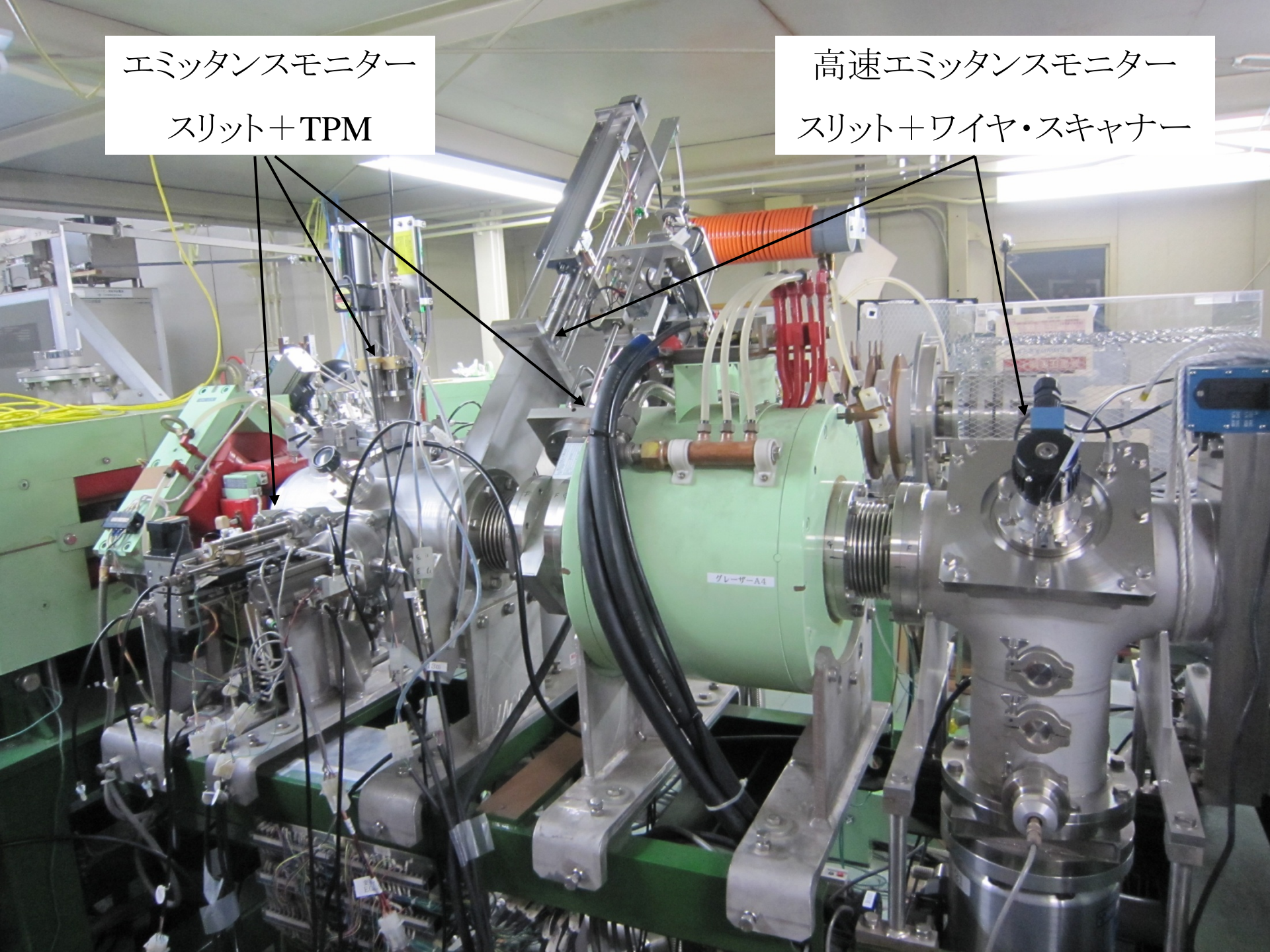
$$\varepsilon_y \sim 60 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$$

(規格化エミッタンス
 $\sim 0.34 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$)

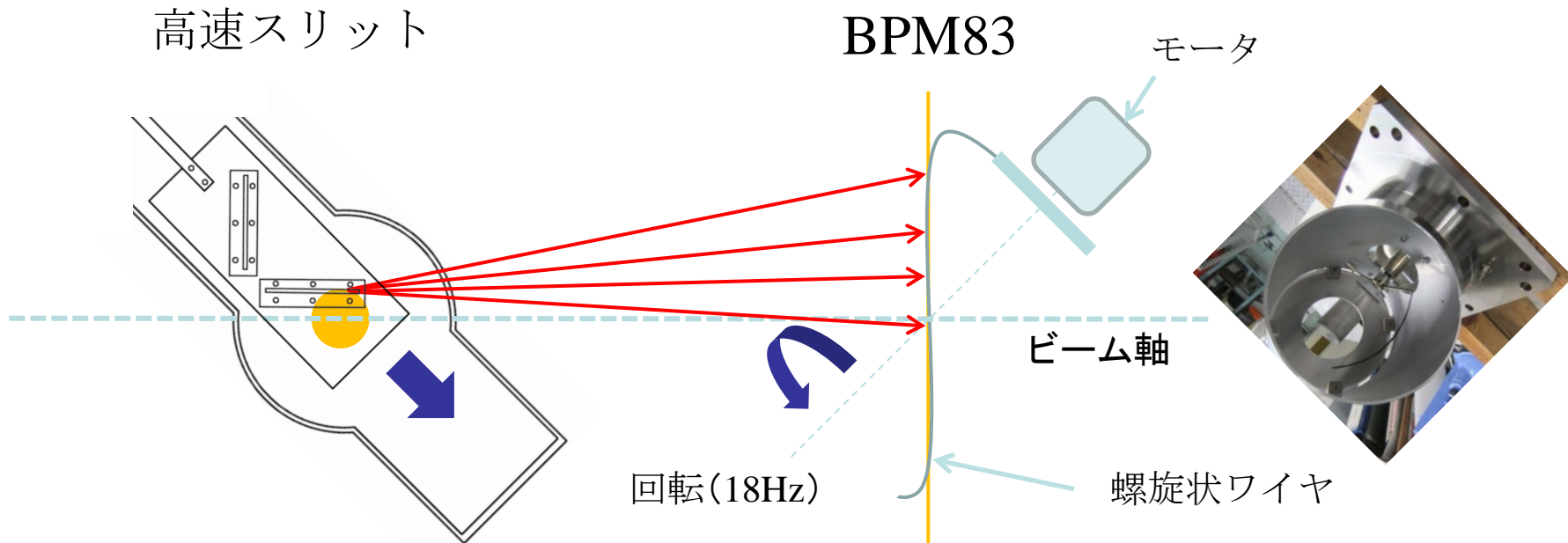


エミッタンスモニター
スリット+TPM

高速エミッタンスモニター
スリット+ワイヤ・スキャナー



高速エミッタンスモニター (LEBT)



- 高速スリット

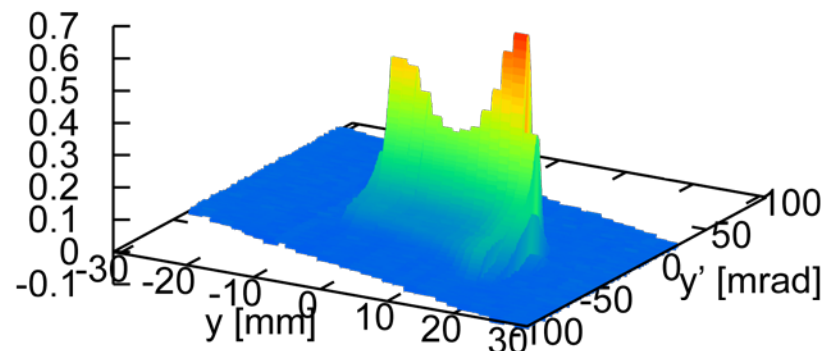
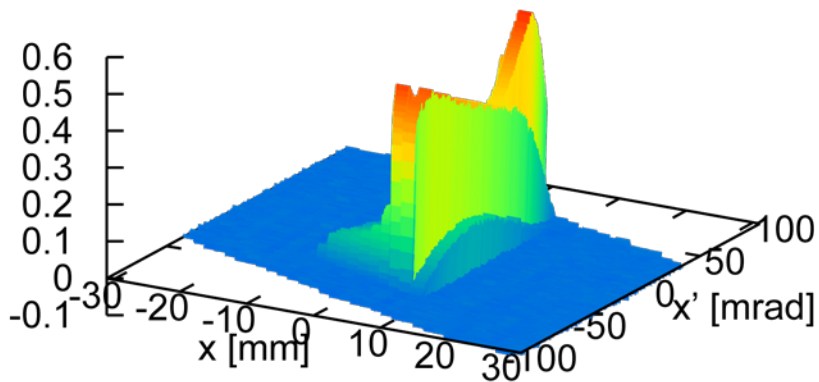
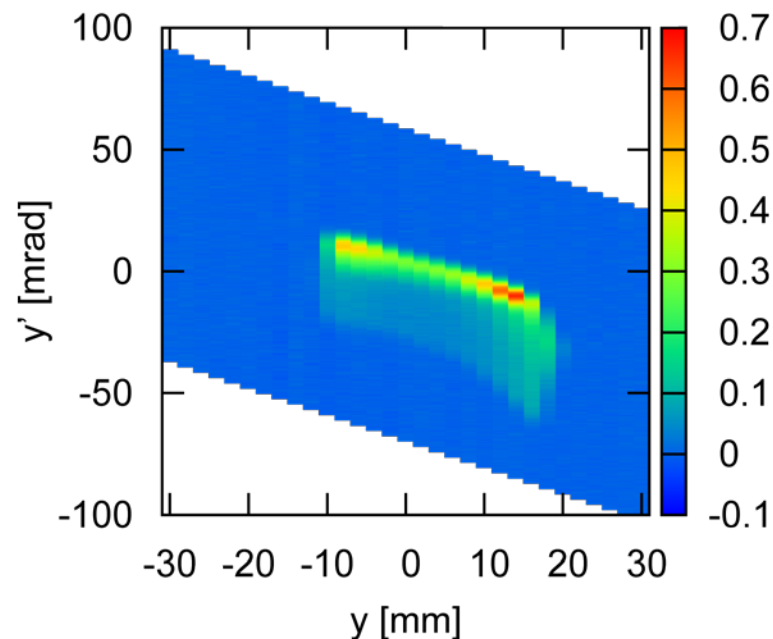
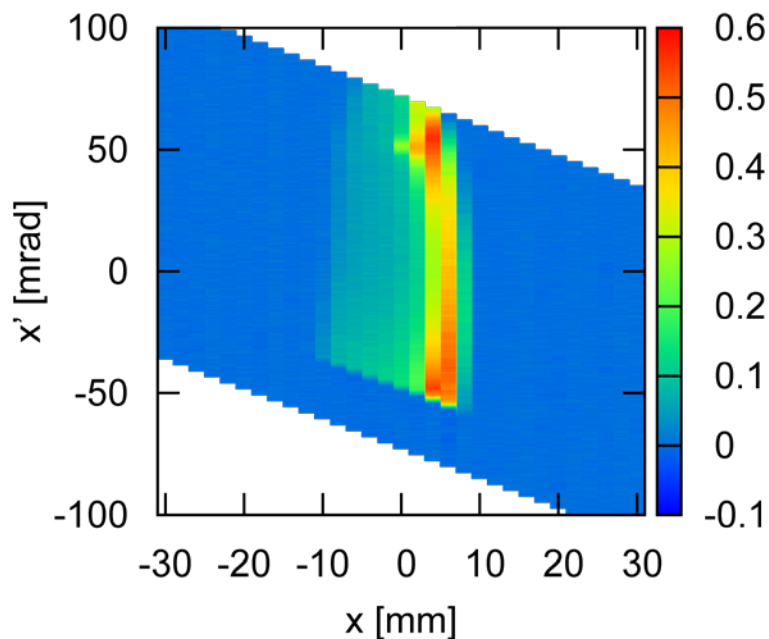
遮蔽板に水平垂直なスリットが切ってある。スリット幅は現在2mm、パルスモータ駆動；4000pulse/secで全スパン290mmを約70秒で移動。

- BPM83

タングステンの螺旋状ワイヤを備えたビームプロファイルモニターで1/18秒でプロファイルを取得。その間にスリットが動く距離は約0.16mm
→スリットの移動による影響は無視できる。

HIPECR / 電極A: 5.7kV / 電極B: -4kV

2012/07/16 04:42.32 (HIPECR)

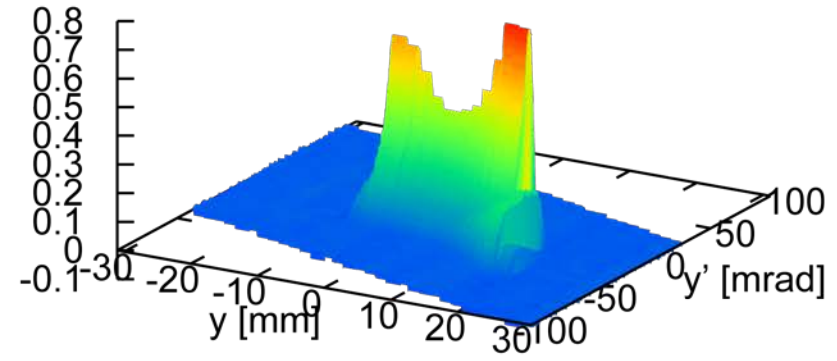
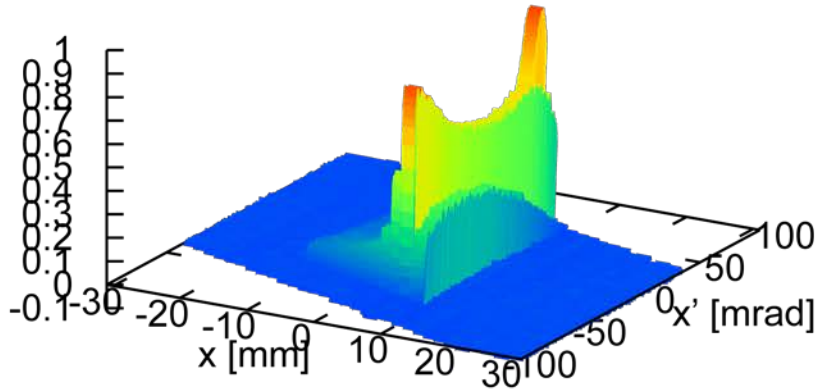
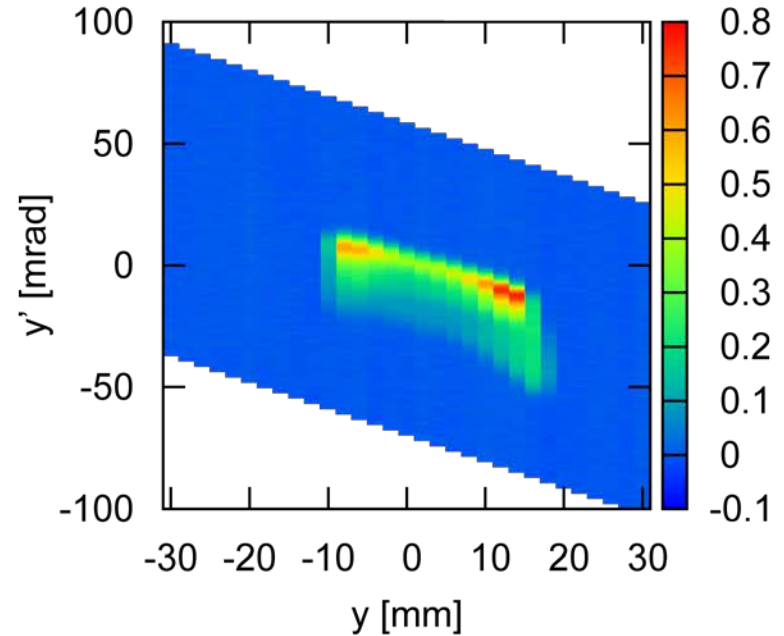
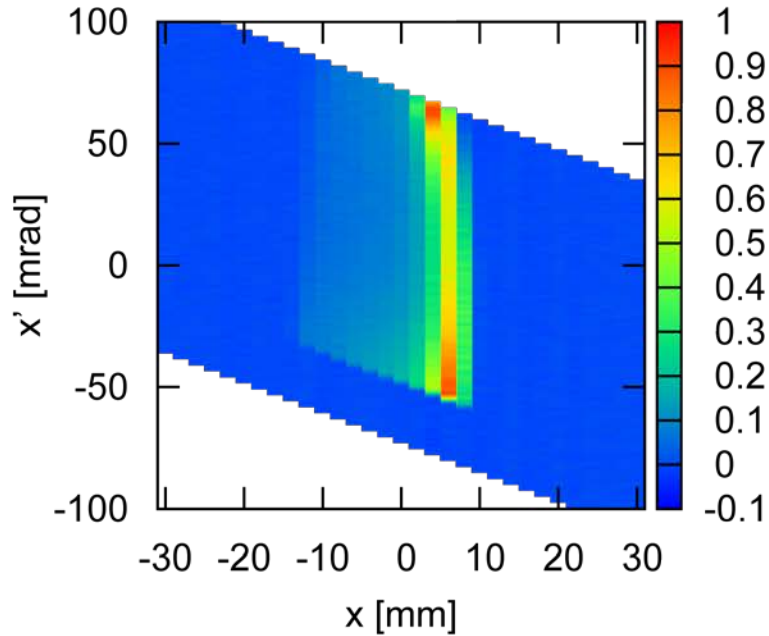


$\epsilon_x = 525.2\pi$ [mm*mrad] (90% of all ions)
 $\epsilon_x = 521.9\pi$ [mm*mrad] (10% of peak value)

$\epsilon_y = 419.1\pi$ [mm*mrad] (90% of all ions)
 $\epsilon_y = 224.4\pi$ [mm*mrad] (10% of peak value)

HIPECR/ 電極A : 5.7kV , 電極B : -9kV

2012/07/16 04:33.28 (HIPECR)

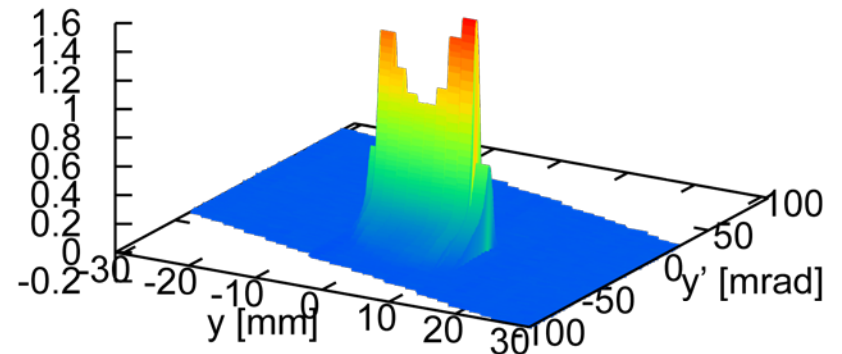
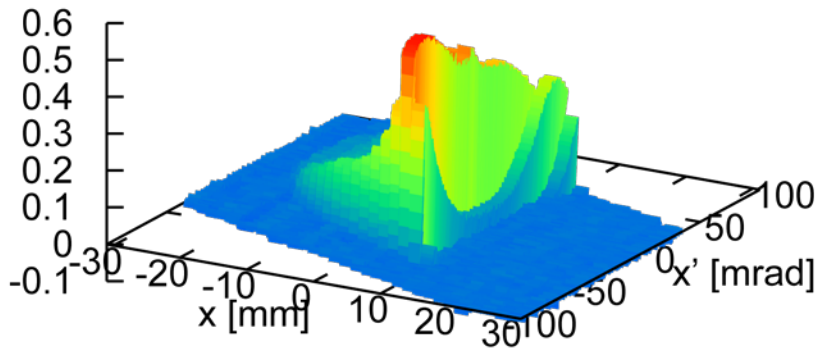
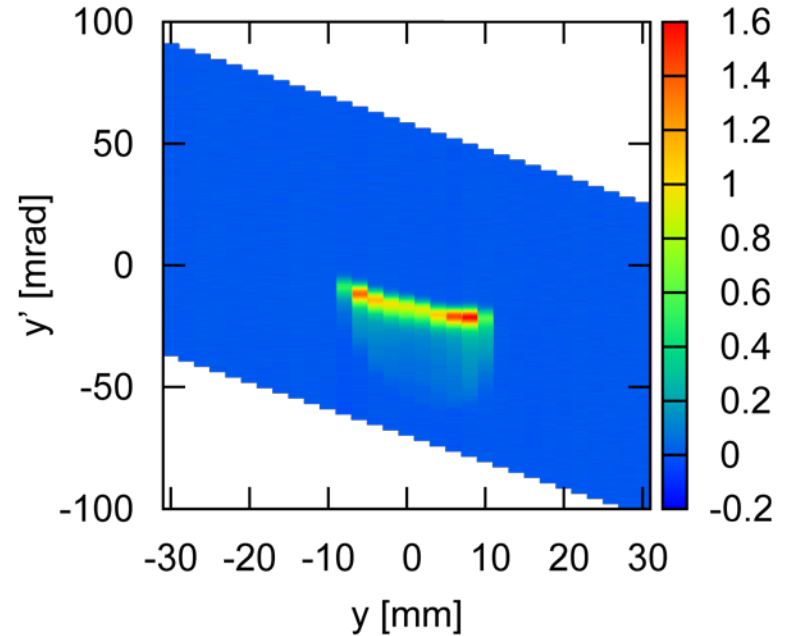
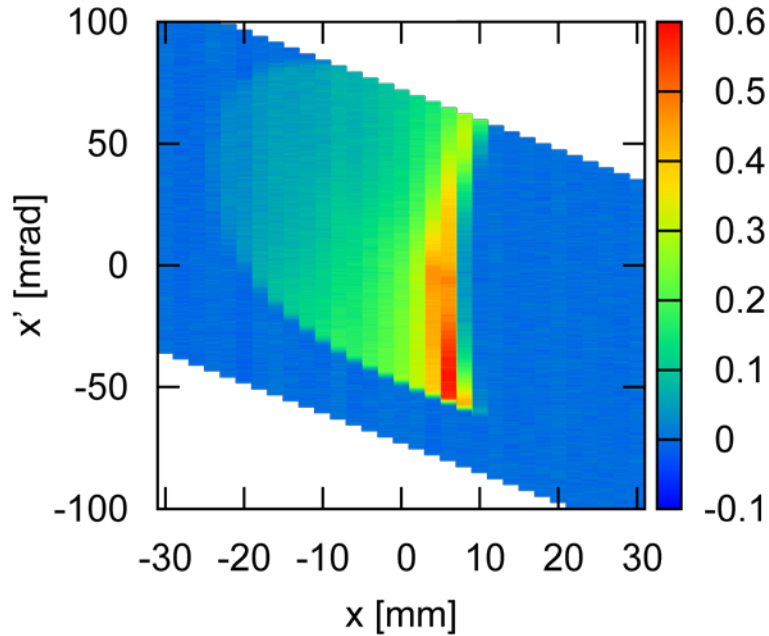


$\varepsilon_x = 641.2\pi$ [mm*mrad] (90% of all ions)
 $\varepsilon_x = 438.4\pi$ [mm*mrad] (10% of peak value)

$\varepsilon_y = 344.2\pi$ [mm*mrad] (90% of all ions)
 $\varepsilon_y = 274.8\pi$ [mm*mrad] (10% of peak value)

HIPECR / 電極A: 5.7kV / 電極B: -14kV

2012/07/16 04:18.39 (HIPECR)

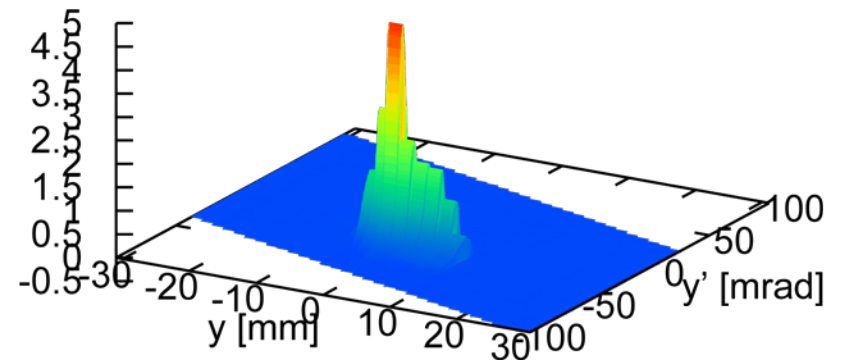
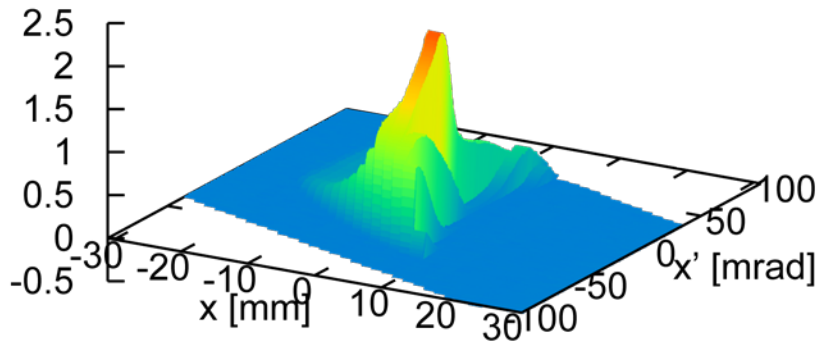
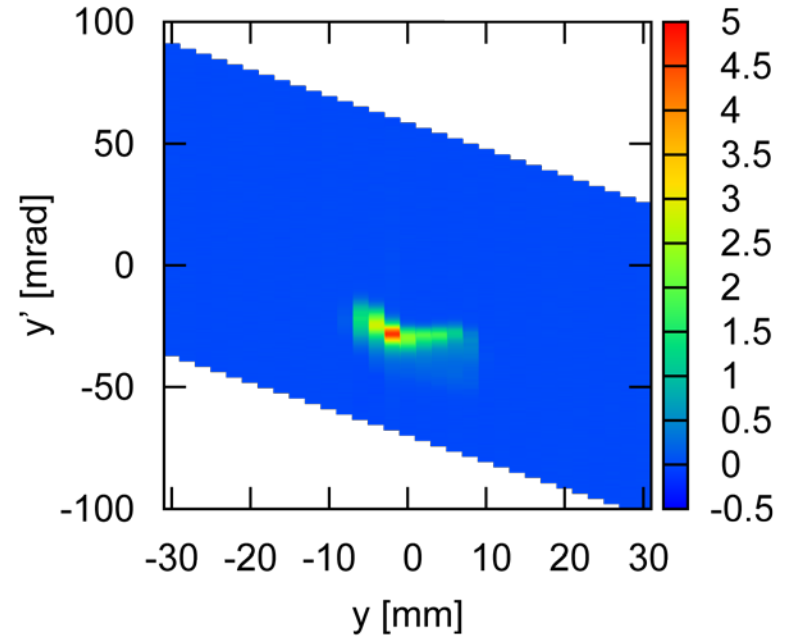
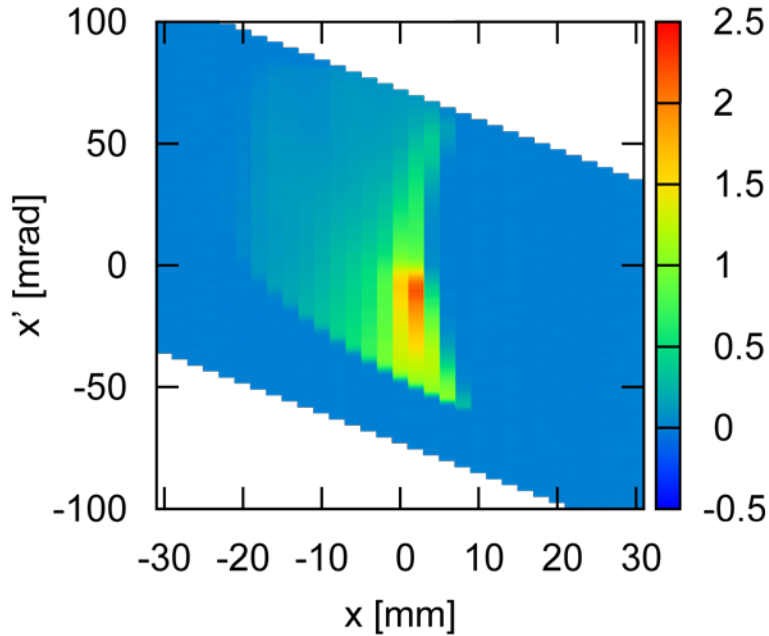


$\varepsilon_x = 842.0\pi$ [mm*mrad] (90% of all ions)
 $\varepsilon_x = 861.7\pi$ [mm*mrad] (10% of peak value)

$\varepsilon_y = 273.9\pi$ [mm*mrad] (90% of all ions)
 $\varepsilon_y = 102.2\pi$ [mm*mrad] (10% of peak value)

HIPECR / 電極A: 5.7kV / 電極B : -19kV

2012/07/16 04:07.08 (HIPECR)



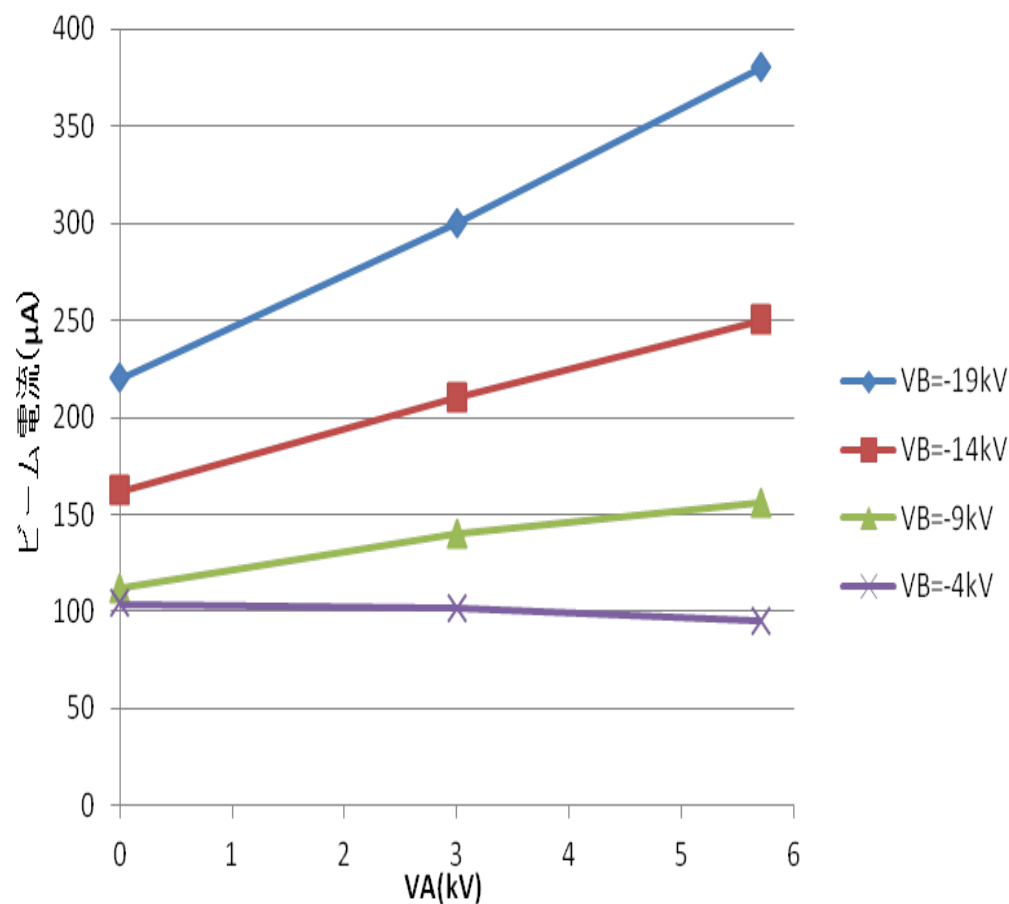
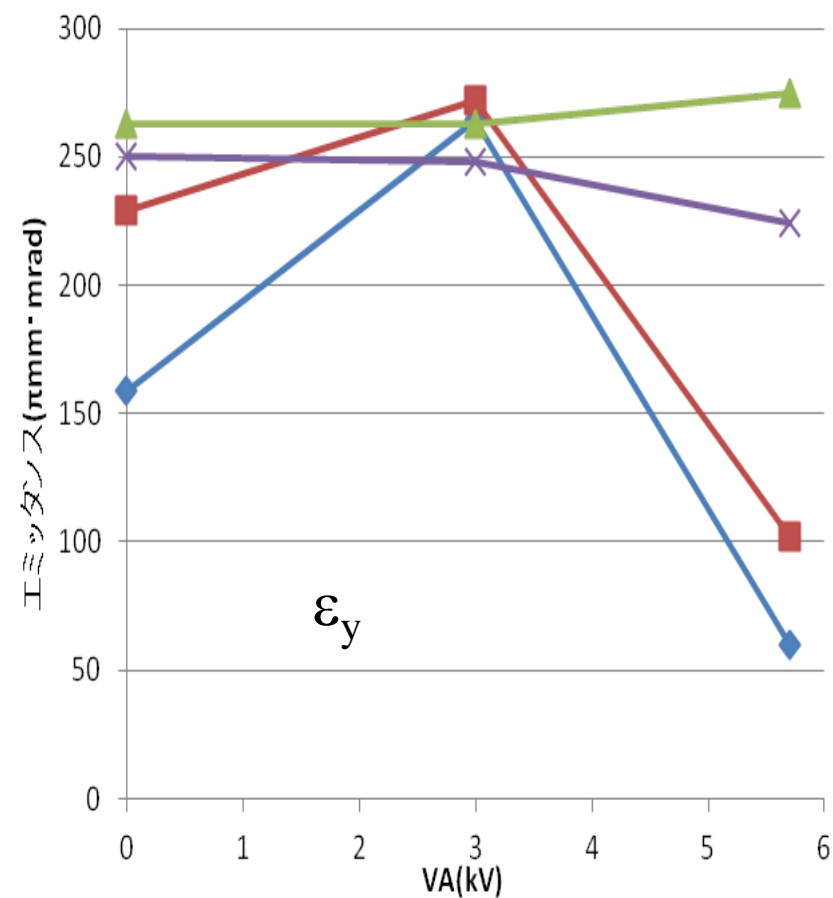
$\epsilon_x = 607.0\pi$ [mm*mrad] (90% of all ions)
 $\epsilon_x = 374.6\pi$ [mm*mrad] (10% of peak value)

$\epsilon_y = 136.6\pi$ [mm*mrad] (90% of all ions)
 $\epsilon_y = 60.5\pi$ [mm*mrad] (10% of peak value)

ビームエミッタンスの引出電圧依存性 (I)

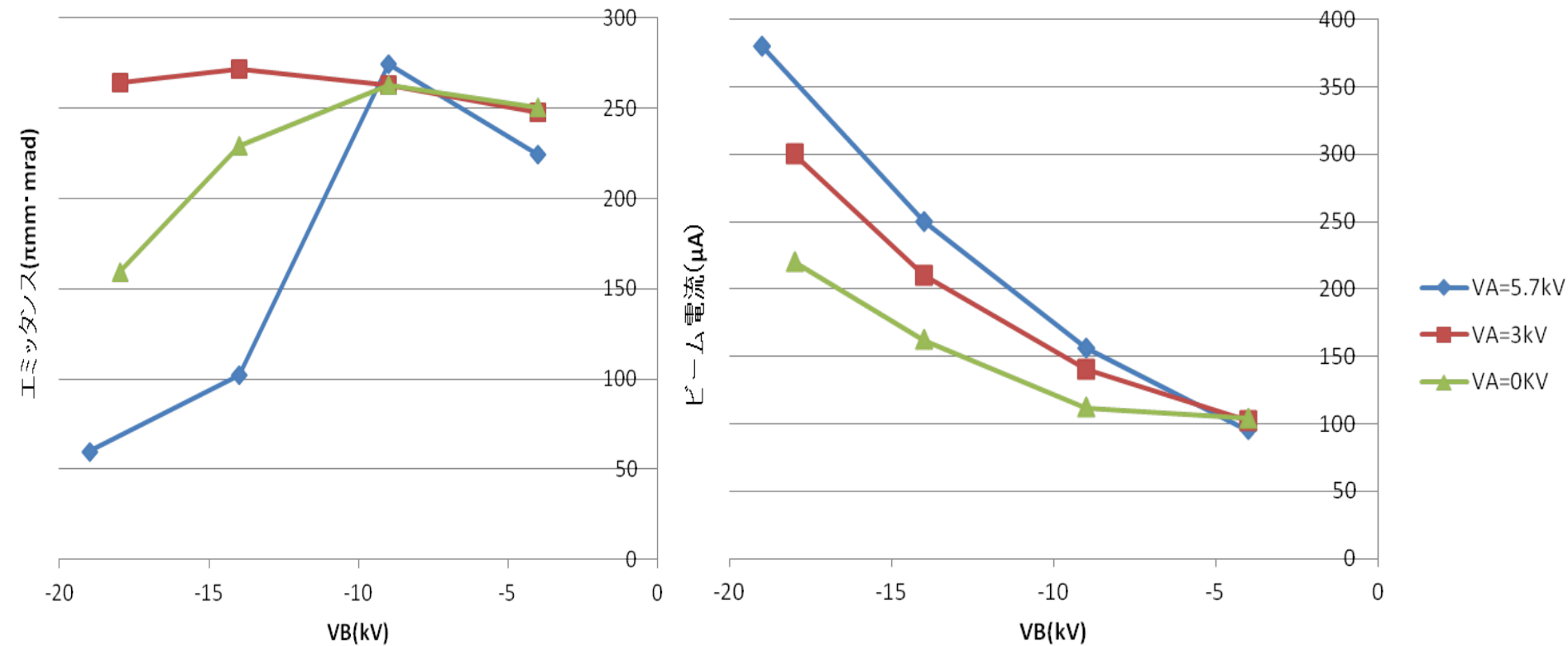
● 電極Aと電極Bの電位に対する依存性

- ・VAとVBの電位差が大きい → 高輝度化(低エミッタンス、大電流)



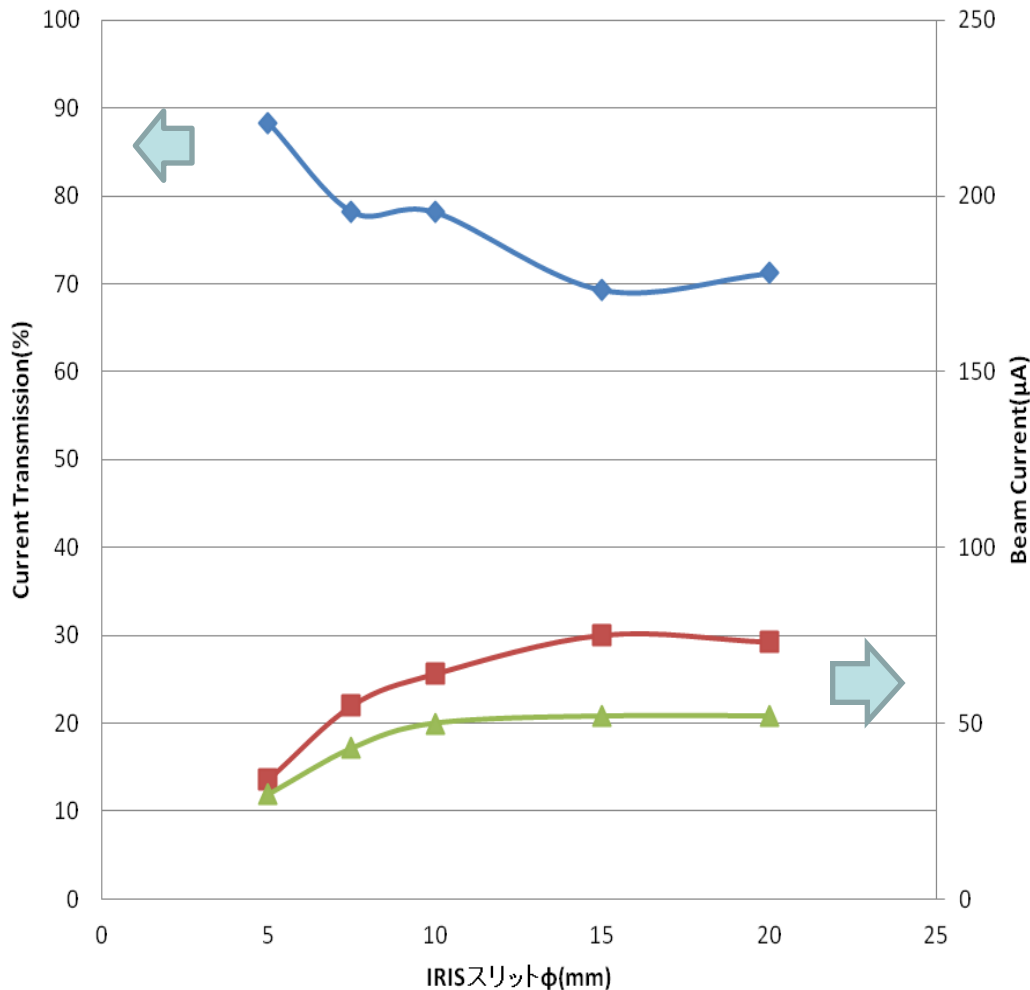
ビームエミッタンスの引出電圧依存性 (II)

※IGUNによるシミュレーション計算では、 $V_B = -35\text{kV}$ で最大輝度が得られる



入射ビーム電流と透過効率

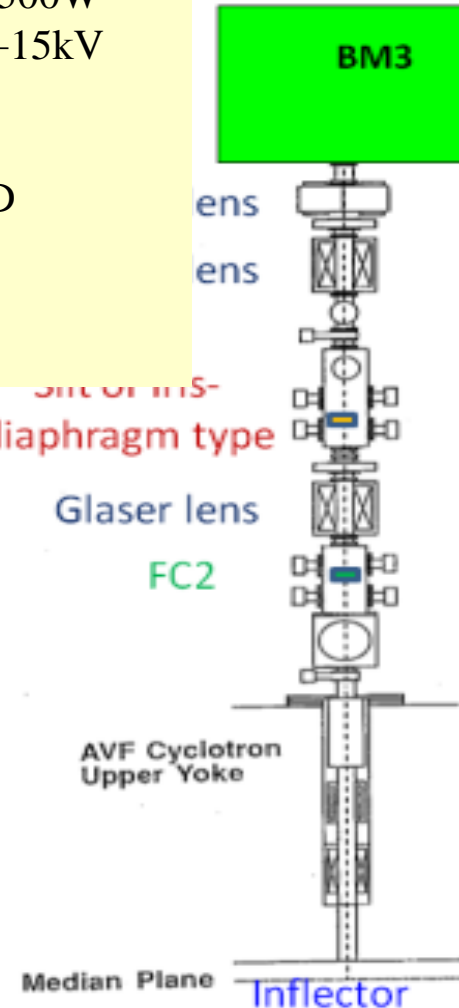
● Irisスリット開口径を変えたときのビーム電流と透過効率



【測定条件】

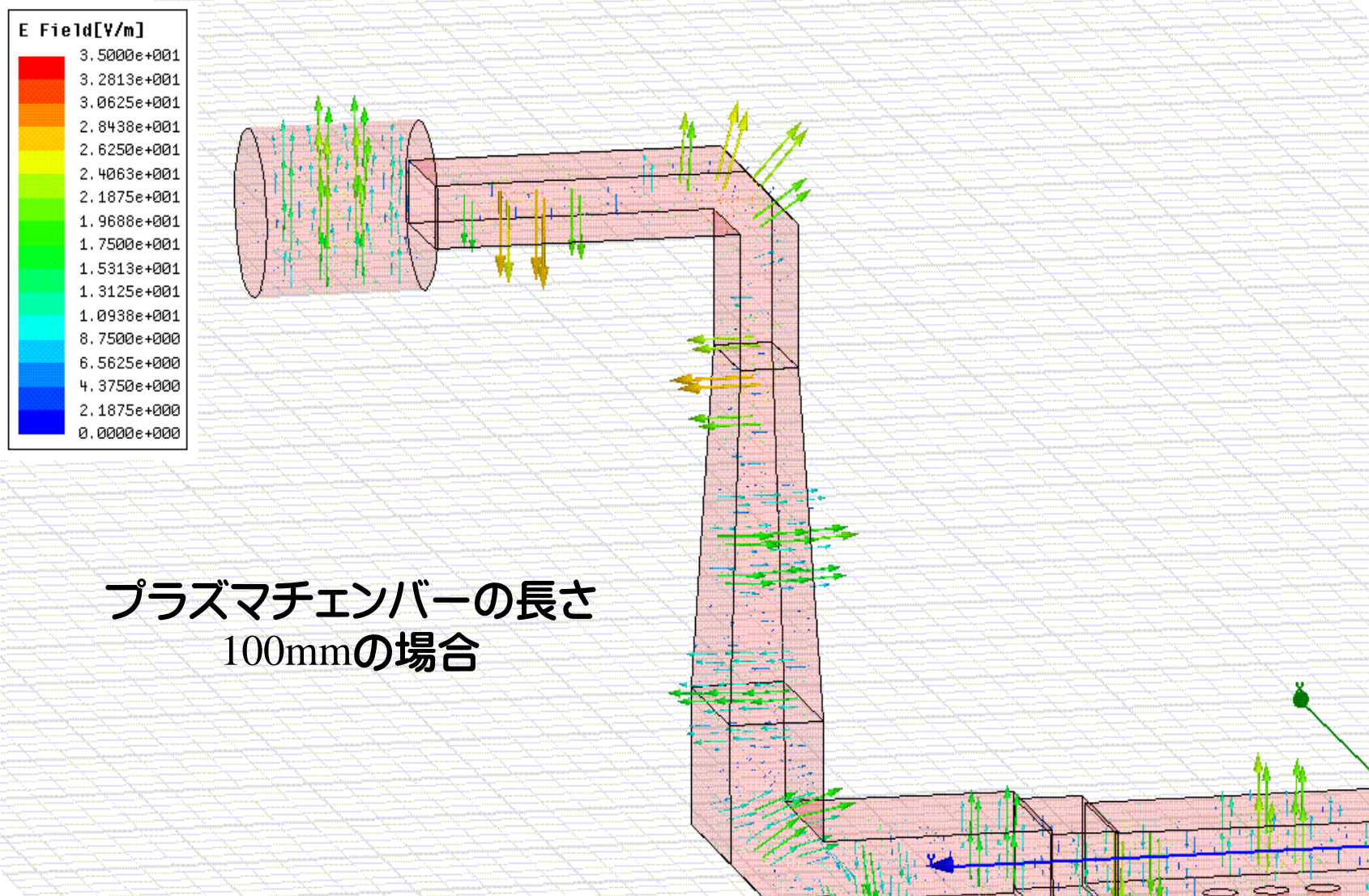
- ・真空度 2.7×10^{-3} Pa
- ・マイクロ波出力 500W
- ・プラズマ電極 +15kV
- ・電極A +8.1kV
- ・電極B -16.7kV
- ・電極C & D GND
- ・ECRスリット制限
水平 ± 3mm、鉛直 ± 3mm

- ◆ Inf/FC2
- FC2
- ▲ Inflector



プラズマチェンバー・サイズの最適化 (II)

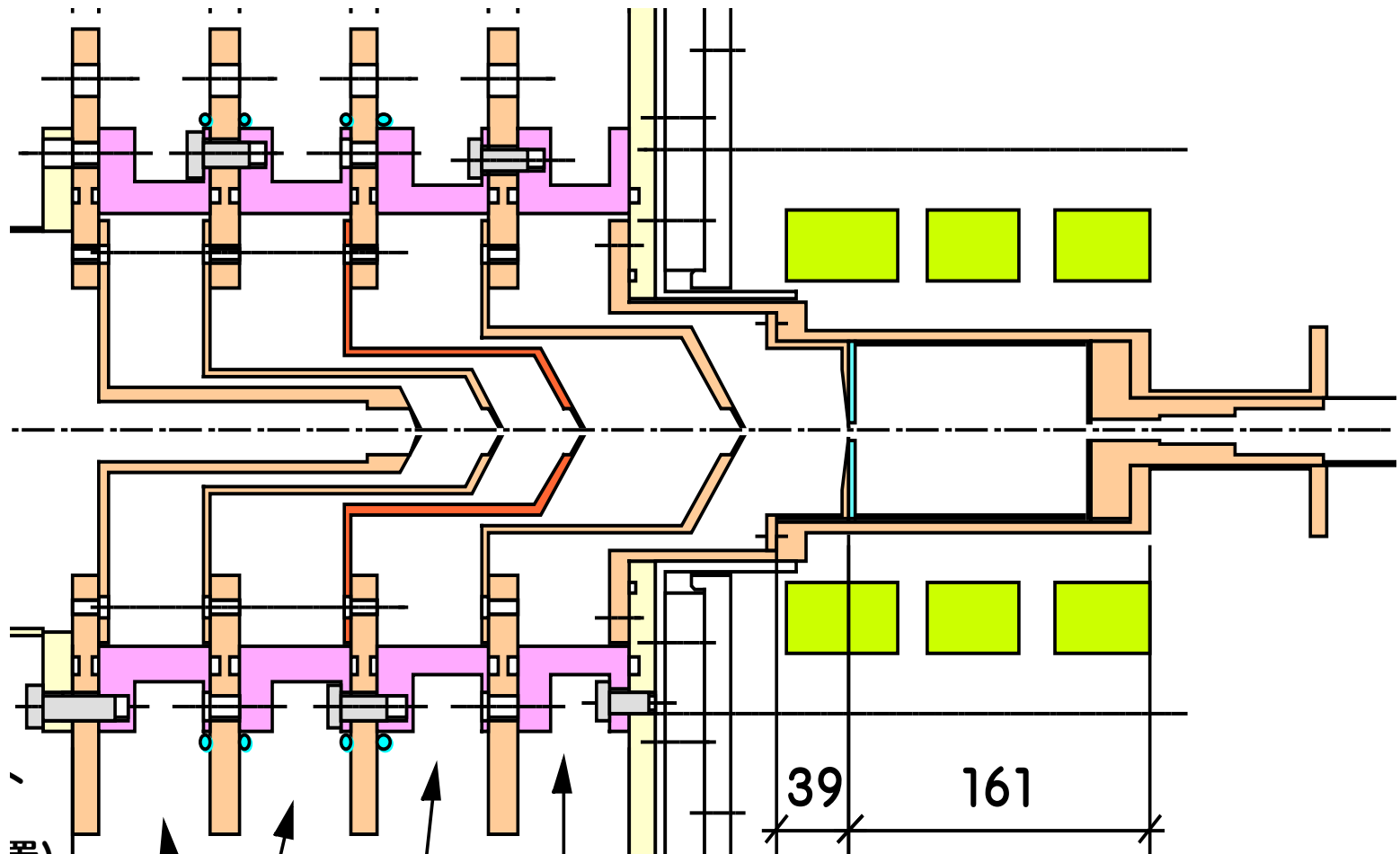
● プラズマチェンバー内に形成されるマイクロ波の電場分布の例



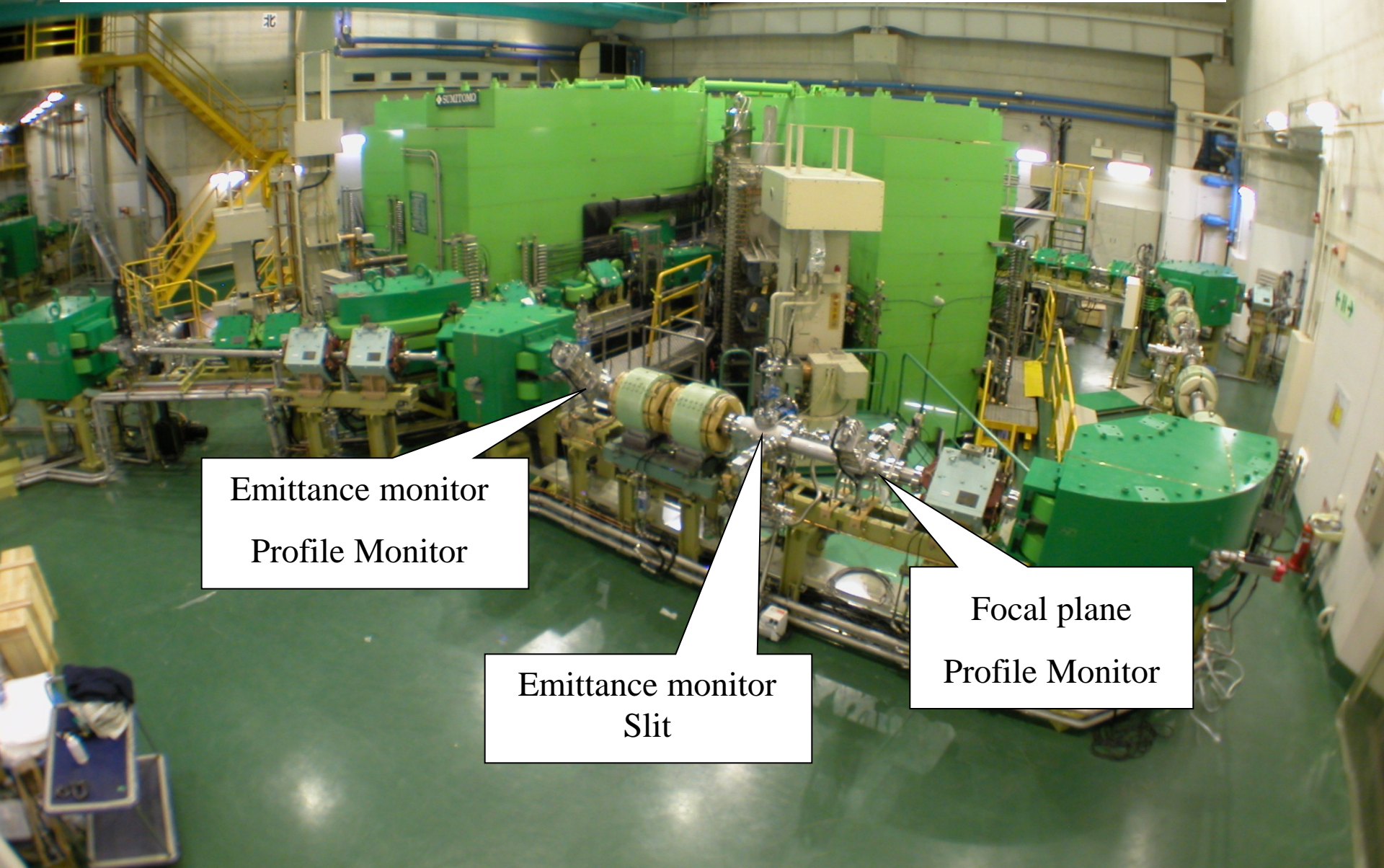
プラズマチェンバーの改良予定

● 改良点

- ・プラズマチェンバーの長さ縮小
- ・マイクロ波導入部のアパーチャー縮小



Emittance monitor in the Beam Analyzing course



Emittance monitor
Profile Monitor

Emittance monitor
Slit

Focal plane
Profile Monitor

ビーム電流とエミッタンス@MEBT

● 実ビームでの性能テスト

- ・65MeV@AVF (392MeV@Ring) プロトンビーム
- ・真空度 3.1×10^{-3} Pa@引出電極近傍
- ・マイクロ波出力 300W
- ・電極電位 プラズマ電極 +15kV、電極A +8.0kV
電極B -12kV、電極C GND、電極D GND
- ・最大電流 ≥ 0.8 mA

・ビーム電流とエミッタンス

AVFサイクロトロン垂直軸入射ラインFC 72 μ A

ECRスリット 水平及び鉛直方向に ± 3 mm

Irisスリット $\phi \sim 10$ mm

AVFサイクロトロン加速・引き出し後 $\sim 5\mu$ A (7%)

エミッタンス(90%)

$$\varepsilon_x = 6\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}, \varepsilon_y = 10\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$$

RCNP K=400 Ring Cyclotron

Magnet

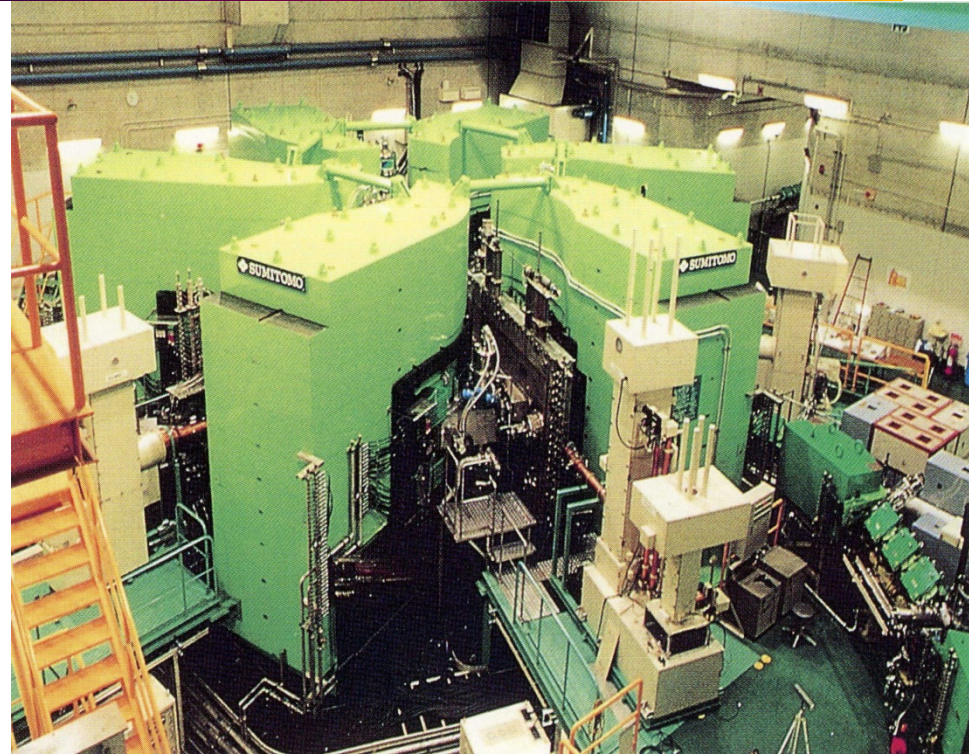
- Sector magnets : 6 sets
- Pole gap : 6 cm
- Maximum magnetic field : 1.75 T
- Trim coils : 36 sets
- Injection radius : 2 m
- Extraction radius : 4 m
- Weight : 2200 tons

Acceleration system

- Single gap type : 3 sets
- Frequency : 30 ~ 52 MHz
- Max. acceleration voltage : 500 kV
- RF power : 250 kW/cavity

Flat-top cavity

- Single gap type : 1 set
- Frequency : 90 ~ 156 MHz



⇒ Key element for high quality beam

World first FT system operating at variable frequencies

RCNP K140 AVF Cyclotron

Magnet

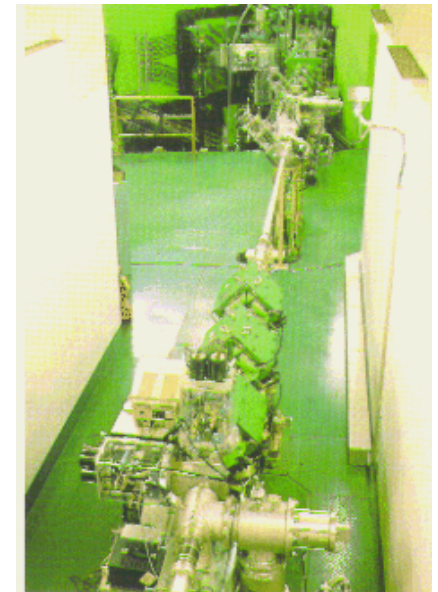
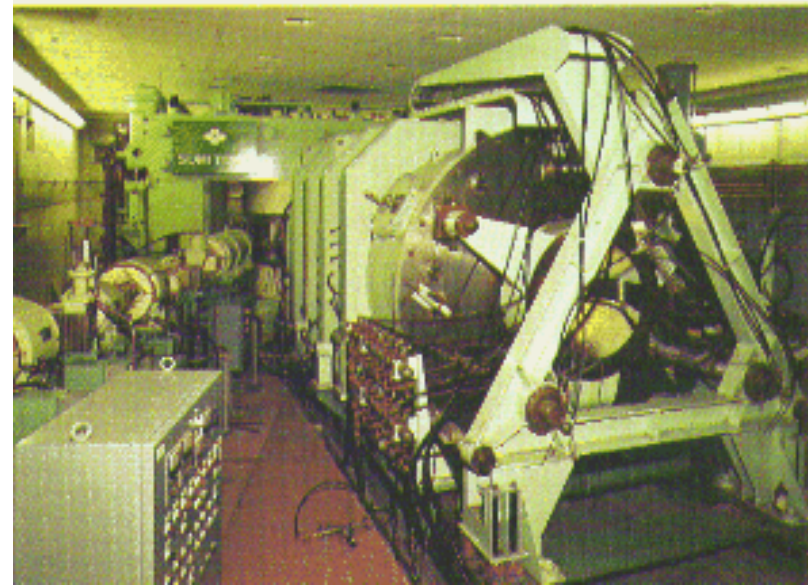
- Pole diameter : 3.3 m
- Pole gap : 20.6 cm ~ 34.7 cm
- Averaged field : 1.6 T
- Trim coils : 16 sets
- Valley coils : 3 ~ 5 sets
- Weight : 400 tons

Acceleration system

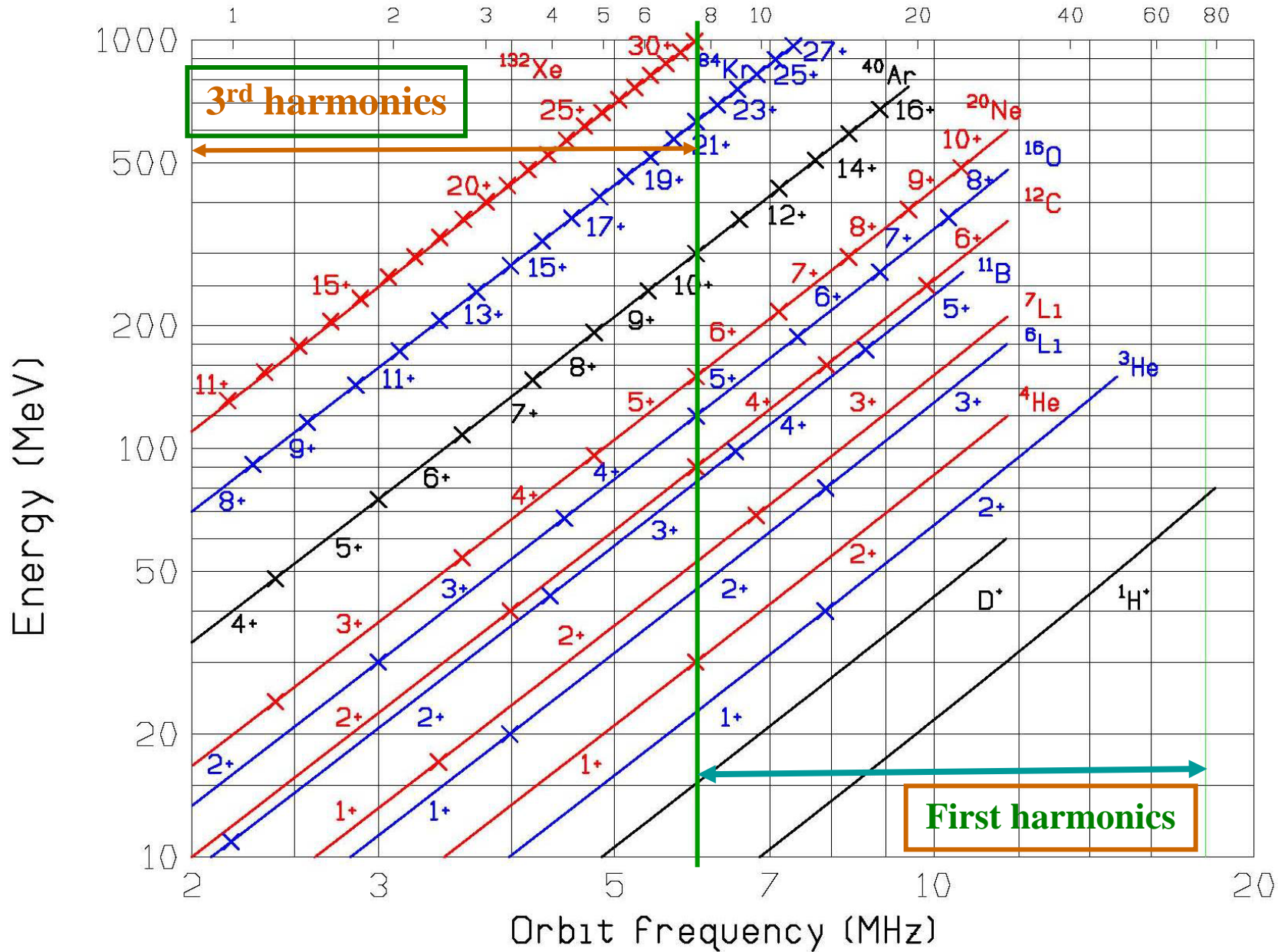
- Dee : Single 180 degrees
- Resonator : Moving short
- Frequency : 6 ~ 18 MHz
- Max. acceleration voltage : 80 kV
- Extraction system : Electrostatic deflector
- **FT system (k=5,7,9)**

Ion Sources

- External ion source : Atomic beam type polarized ion source, ECR ion source
18 GHz SCECR ion source
2.45GHz ECR proton source



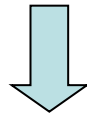
Energy at R = 100 cm (MeV/nucleon)



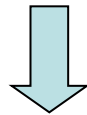
新入射器の検討（概念設計）

大強度、高品質ビームを目指したリングサイクロトロン計画

小型AVF + 小リング（SSC1） + 大リング（SSC2）



現有AVF + 中型リング（K=400）

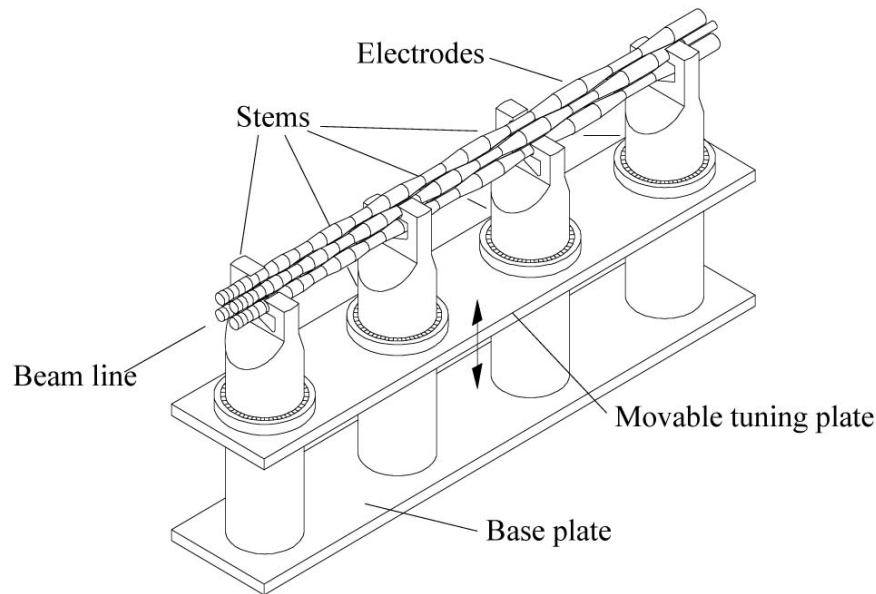


AVF → 可変周波数RFQ + SSC

可変周波数 RFQ

概念設計（群馬：山田氏、理研：上垣外氏、．．．）

1. 4 ロッド型
2. リングでのハーモニック数 $h=6$ 、 $h=10$ に対応して
軽イオン（ p 、 ${}^3\text{He}$ ）、重イオン用とする



Scheme of the VE-RFQ

RFQ パラメータ (by PARMTEQ)

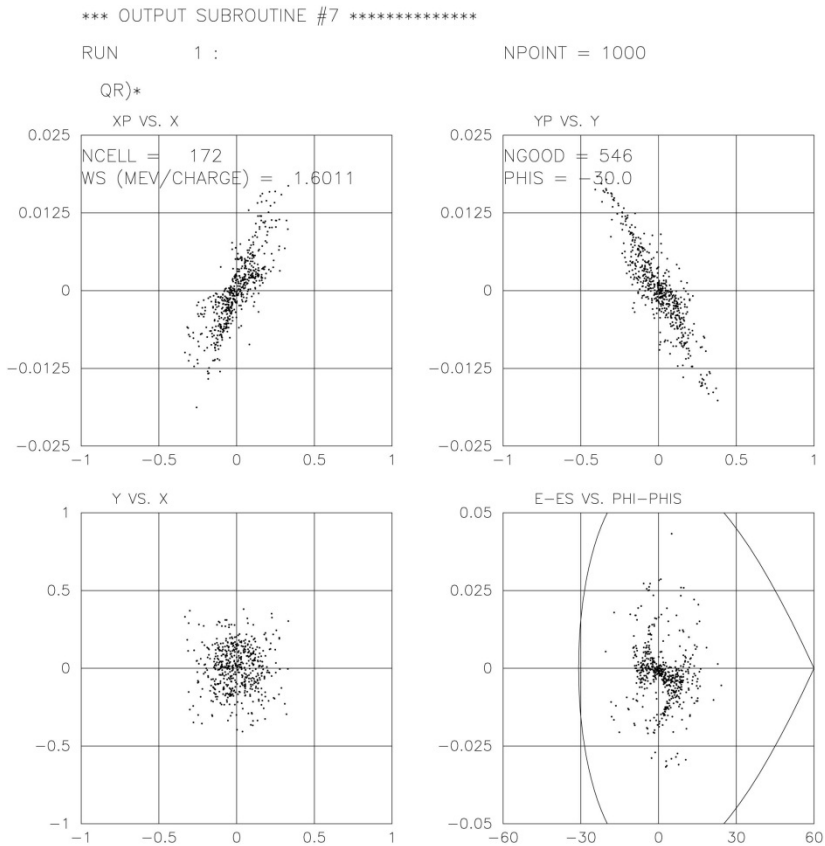
軽イオン用 :

ベイン長	443 cm
周波数	90 – 155 MHz
質量電荷比	1 – 1.5
入射エネルギー (最高)	50 keV/q
出射エネルギー (最高)	1.64 MeV/q
ベイン間電圧	45 kV
最小ボア半径	0.479 cm
最大変調	2.1
収束係数 (B)	3.2
高周波発散	-0.105
最終同期位相	-30°

重イオン用 :

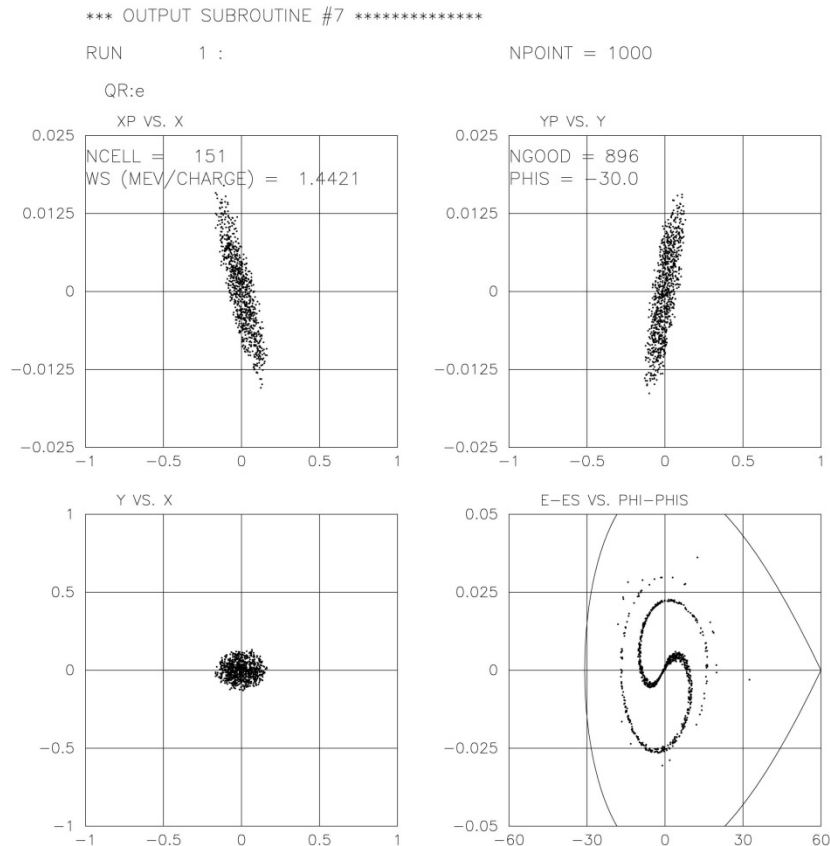
ベイン長	375 cm
周波数	60 – 105 MHz
質量電荷比	2 – 5
入射エネルギー (最高)	36 keV/q
出射エネルギー (最高)	0.72 MeV/q
ベイン間電圧	42 kV
最小ボア半径	0.308 cm
最大変調	2.3
収束係数 (B)	7.0
高周波発散	-0.14
最終同期位相	-30°

PARMTEQ 計算例



NORMALIZED 90% EMITTANCE AND ELLIPSE PARAMETERS (BGS = 0.058444)
UNIT IS PI*CM*MRAD FOR X & Y AND PI*MEV*MRAD FOR DP

	EMIT	ERMS	XC	YC	ALPHA	BETA	GAMMA
X - XP	0.124	0.016	0.00	-0.02	-1.4410	665.66	0.003119
Y - YP	0.137	0.018	0.00	0.01	1.9896	871.07	0.004544
DP - DW	6.480	0.665	0.03	-2.56	0.2691	16.63	0.004353



NORMALIZED 90% EMITTANCE AND ELLIPSE PARAMETERS (BGS = 0.039354)
UNIT IS PI*CM*MRAD FOR X & Y AND PI*MEV*MRAD FOR DP

	EMIT	ERMS	XC	YC	ALPHA	BETA	GAMMA
X - XP	0.043	0.008	0.00	-0.01	1.5364	526.21	0.004486
Y - YP	0.042	0.009	0.00	-0.02	-1.0478	276.04	0.003978
DP - DW	8.067	1.554	-0.03	-0.86	0.0239	10.58	0.000054

軽イオン (150MHz)

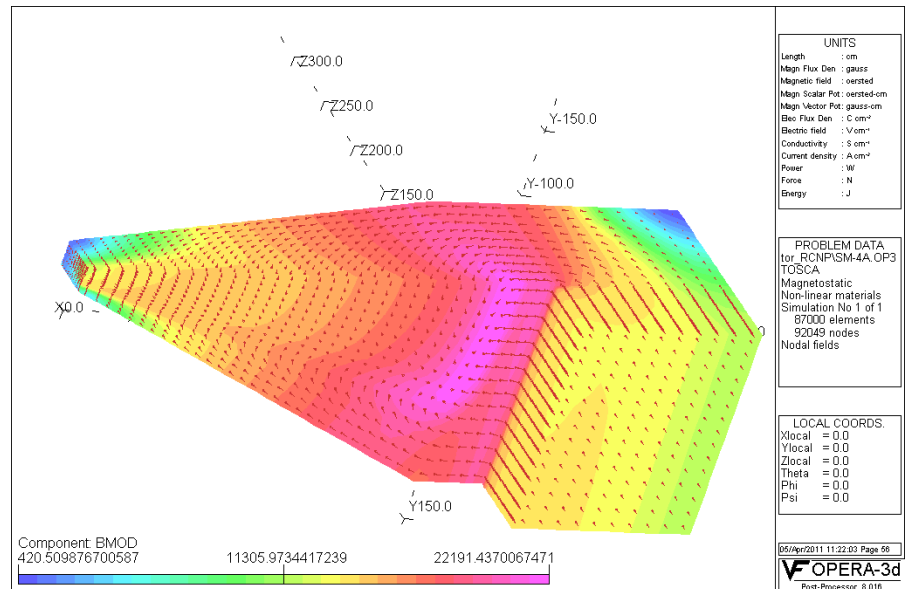
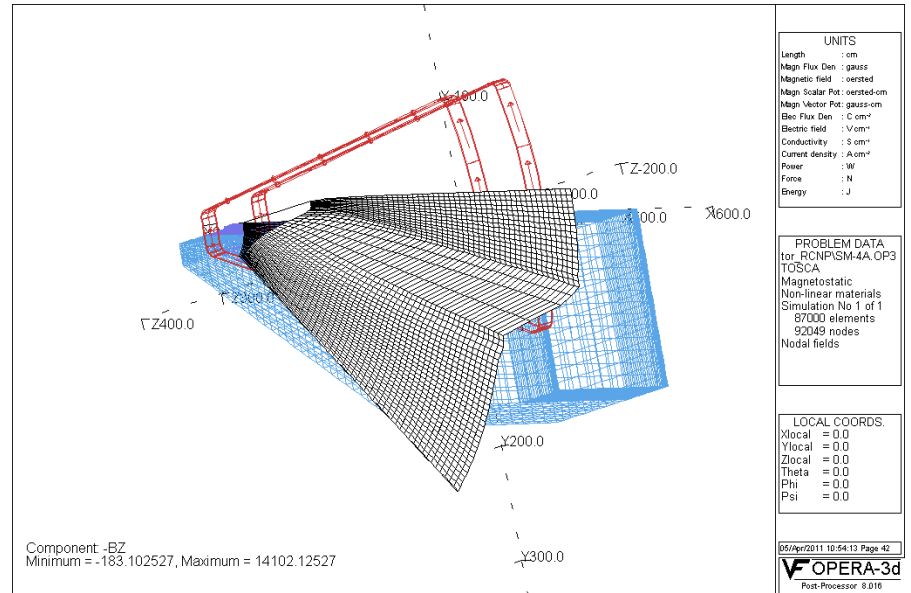
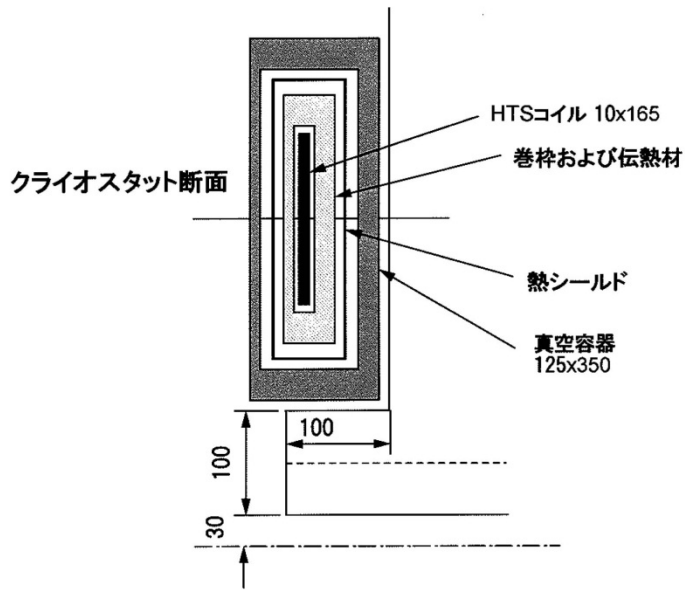
重イオン (100MHz)

SSC の概念設計 (I)

1. 周波数範囲はリングサイクロトロンと同じ：30-52MHz
2. 4セクター、平均入射半径：0.5m、平均取出し半径：3m
3. ハーモニック数：9（軽イオン）、15（重イオン）
4. ディー電極の開き角を 17° とする。数値計算の結果、実質的RF角度は 134° 、 224° となり実効加速電圧は90%以上である。
5. 既設の建物（W実験室）に設置する。実験室の高さに制限があるため、セクター磁石の磁極幅を 33° 、ヨーク幅を 50° とする。

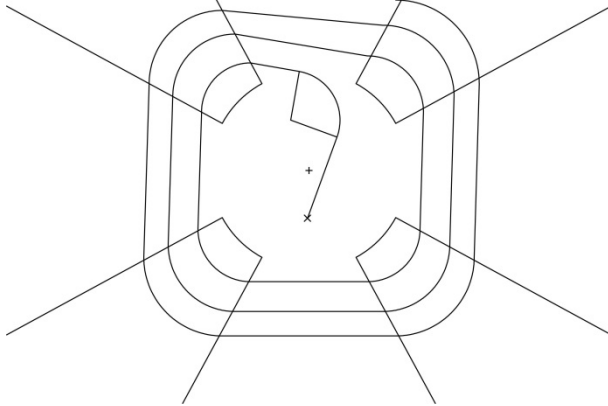
	b_{ext}	b_{inj}	V_{inj} (MV)	Br_{inj} (kG·cm)	Br_{ext} (kG·cm)
p 65MeV	0.35409	0.05902	1.64	185	1185
30MeV/u	0.24785	0.04131	1.60	258	1589
22.3MeV/u	0.21476	0.03580	1.44	268	1640

高温超伝導セクター磁石



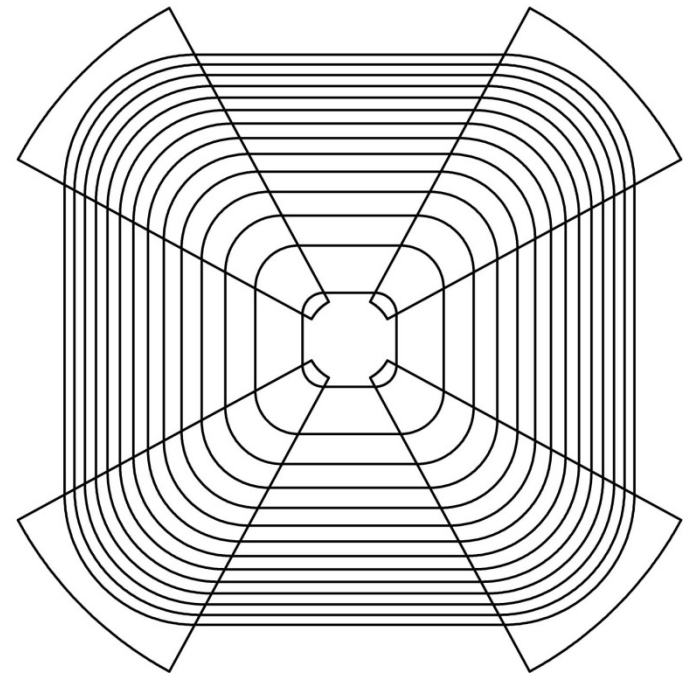
SSC の概念設計 (II)

SSC n_sect: 4 Sector_angle: 33.0 deg.



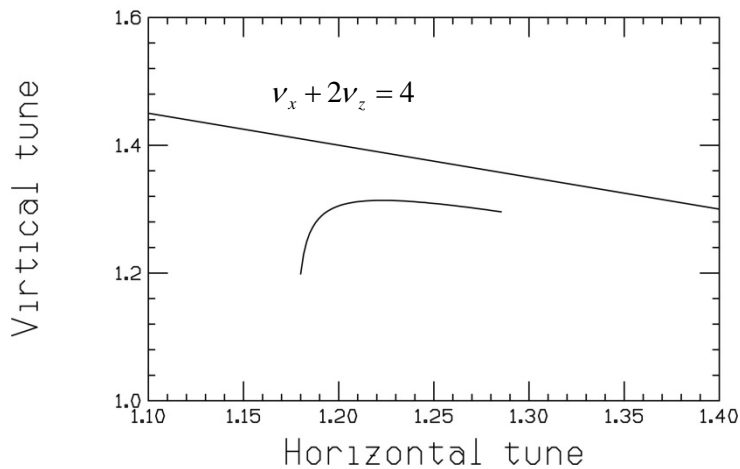
中心領域

SSC n_sect: 4 Sector_angle: 33.0 deg.

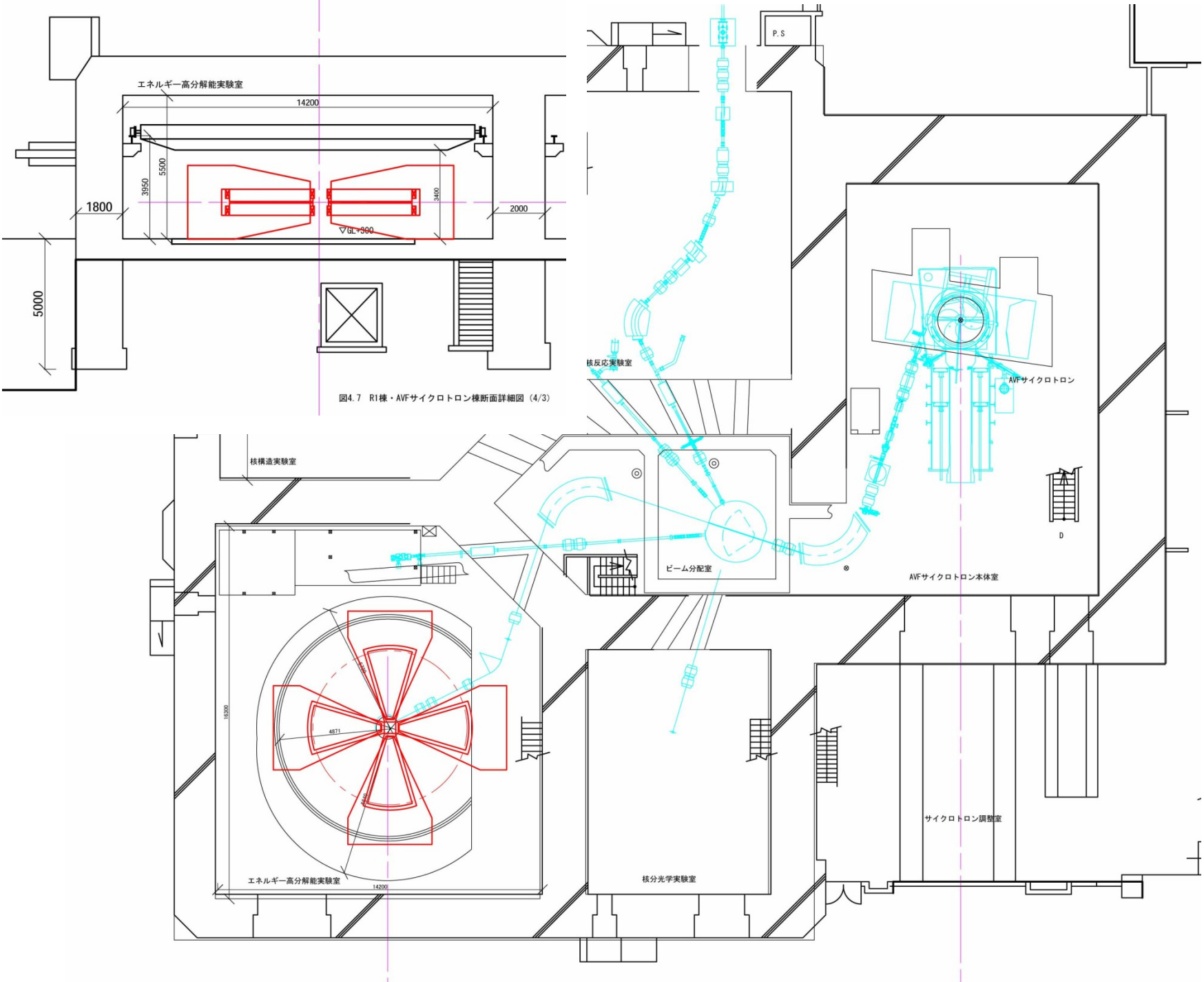


平衡軌道

SSC n_sect: 4, Sector_angle: 33.0 deg.



ベータトロン振動数



Cu-oxide HTS materials

- 1986: discovery of $(\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x)_2\text{CuO}_4$
J.G. Bednorz and K.A. Müller
- Significant effort went into the development of new and improved conductor materials.
- It became possible to manufacture long HTS wires over km.

1st generation HTS wires ($T_C = 110 \text{ K}$)

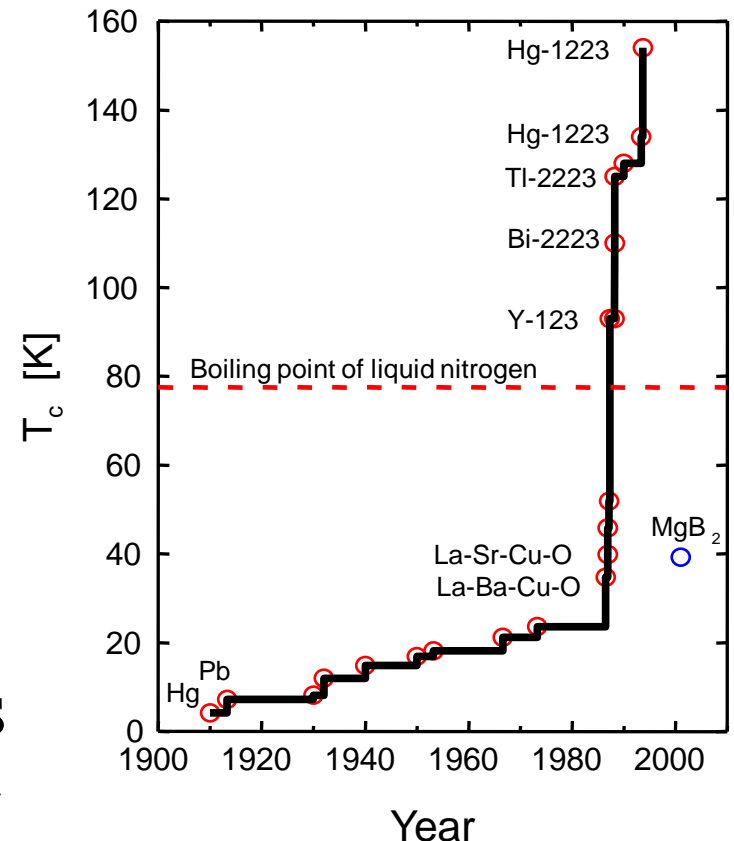
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi-2223)

2nd generation HTS wires ($T_C = 95 \text{ K}$)

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO / Y-123)

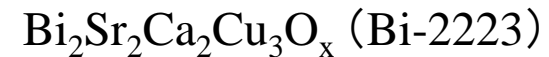
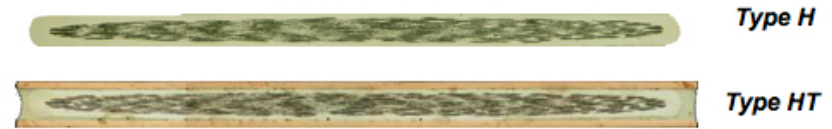
- Although many prototype devices using HTS wires have been developed, so far there have been limited applications to accelerators and beam line facilities.

History of transition temperature

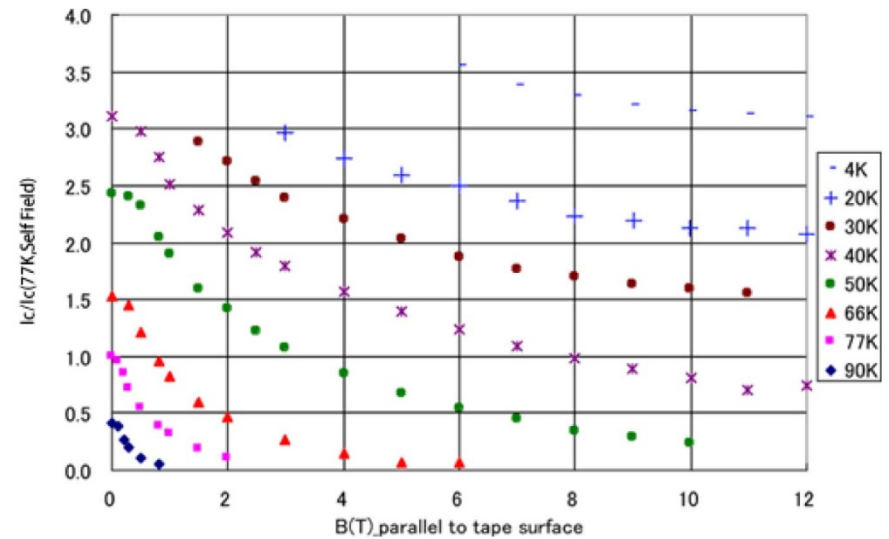
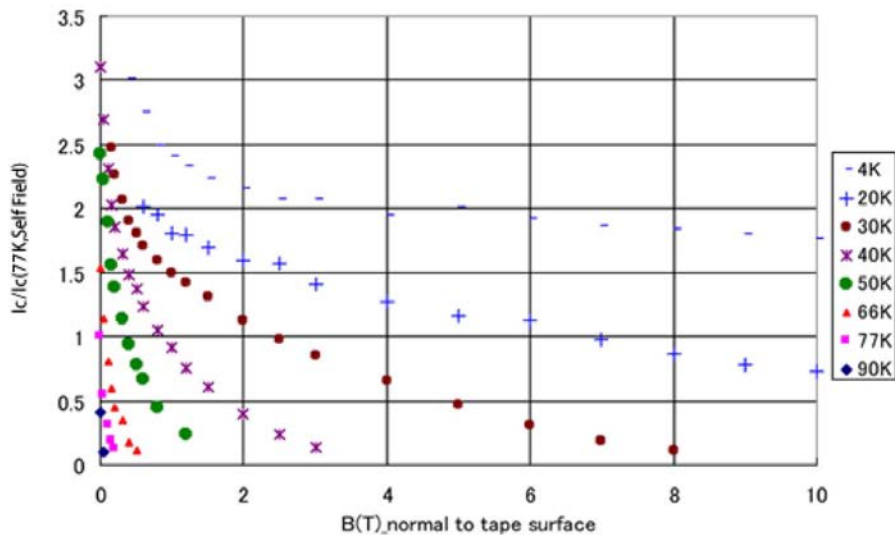


First-generation HTS wire

- Wire consists of a flexible composite of filaments in a silver alloy matrix with a thin stainless steel lamination that provides mechanical stability and transient thermal conductivity.
- Wire is in thin tape-form approximately 4 mm wide and 0.3mm thick.



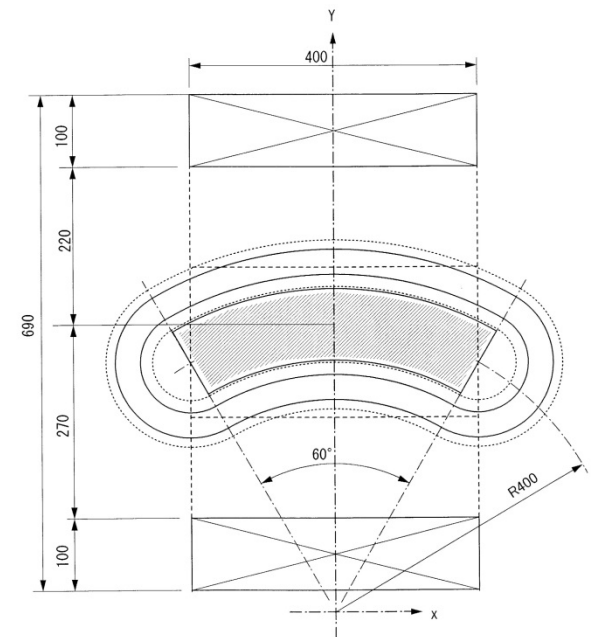
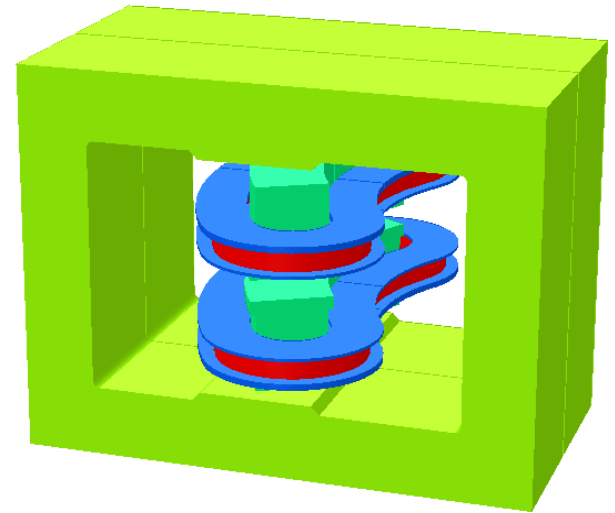
(Sumitomo Electric Industries, Ltd.)



Critical current depends on the operating temperature and the strength and direction of magnetic field on the tape surface. It is scaled by I_c at 77K and self field.

Specification of the prototype dipole magnet

- Orbit radius : 400 mm
- Deflection angle : 60 deg.
- Pole gap : 30 mm
- Cold pole
- Laminated pole and yoke for pulsed operation





Double pancake (DP) was wound with applying tensile stress.



Each DP was fixed with epoxy resin in vacuum.



Three DP and cooling plates are stacked and fixed with epoxy resin in vacuum.

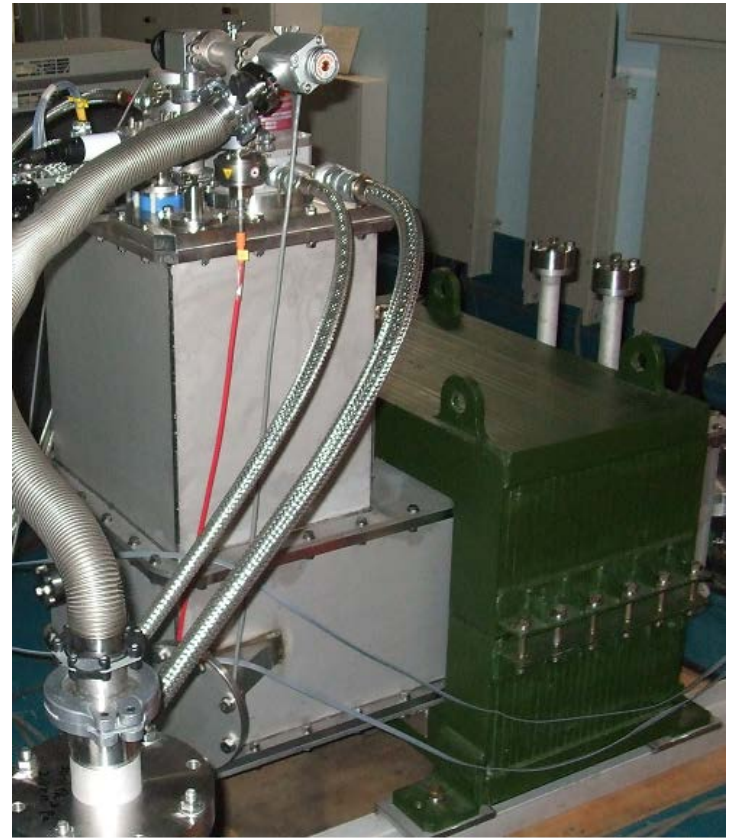


9mm and 4.5mm thick iron plates were put on outside and inside of a coil, respectively.

- Coils are fixed to poles to bear the electromagnetic expansion force of 112,000 N/m.
- Poles are formed by stacking 2.3mm thick carbon steel plates.
- Coils and poles weigh 56 and 90kg, respectively. Total weight of the coil mass is 250kg.

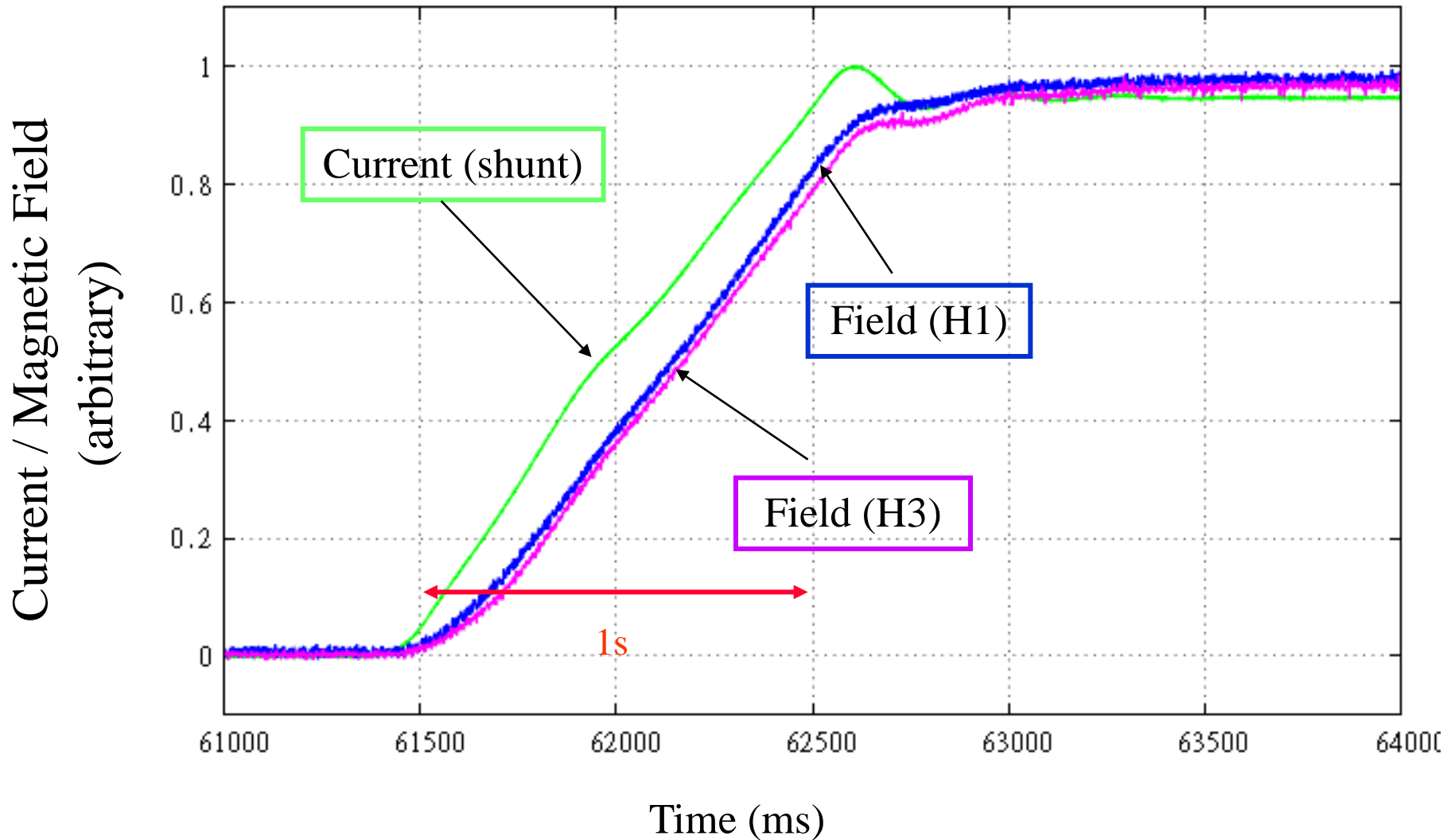


Cold mass



Assembled dipole magnet

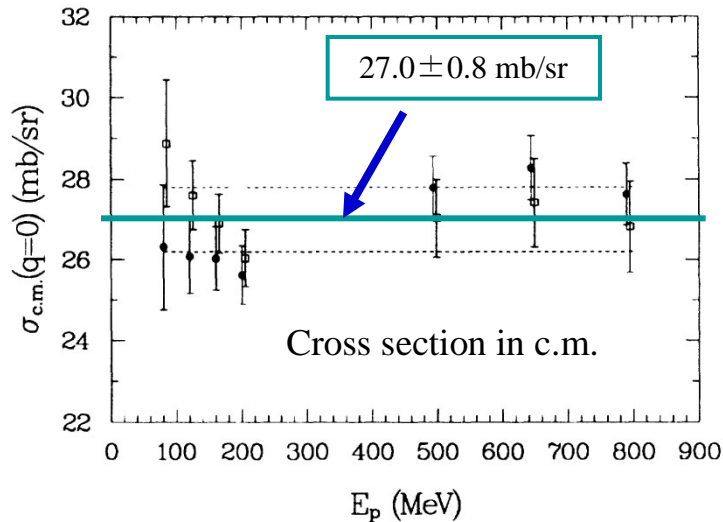
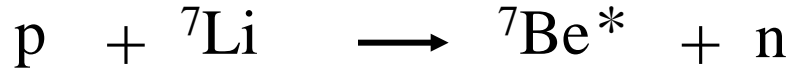
Excitation by pulsed current



中性子（ビーム）の応用@RCNP

- (準単色) 中性子
 - 核反応データベース (高階氏)
- 白色中性子
 - 医療用アイソトープ (高橋氏)
 - 半導体の放射線損傷
- 超冷中性子
 - 中性子 EDM 測定 (増田氏、川崎氏)

準単色中性子



${}^7\text{Be}$	$7/2^-$ —————	4.57
	$1/2^-$ —————	0.429
	$3/2^-$ —————	0.0

FIG. 8. Zero-momentum-transfer cross sections (c.m.) obtained from Gaussian fits to the experimental cross-section distributions. The solid circles correspond to normalization based upon a constant value for I_q [Eq. (5)]. The open squares correspond to normalization based upon the parametrization of Eq. (1). The dotted line corresponds to a constant c.m. cross section $\sigma_0 = 27.0 \pm 0.8$ mb/sr. The dashed lines represent the one standard deviation limits.

T.N. Taddeucci et al.,

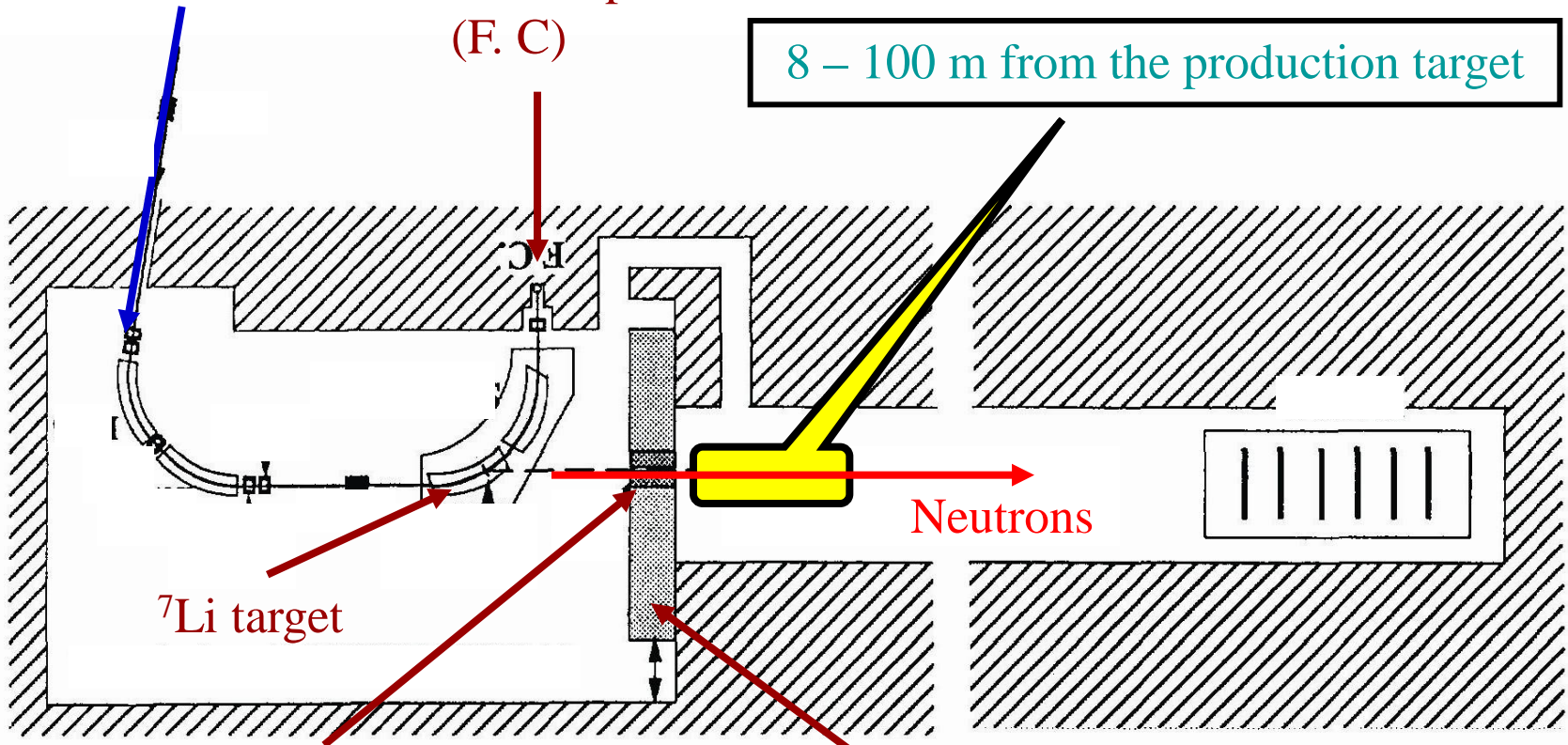
Phys. Rev. C 41 (1990) 2548-2555

準単色中性子源@RCNP

Proton beam
from cyclotron

Beam dump
(F. C)

8 – 100 m from the production target



^7Li target

Neutrons

Clearing magnet
($100 \times 100 \text{ mm}^2$)

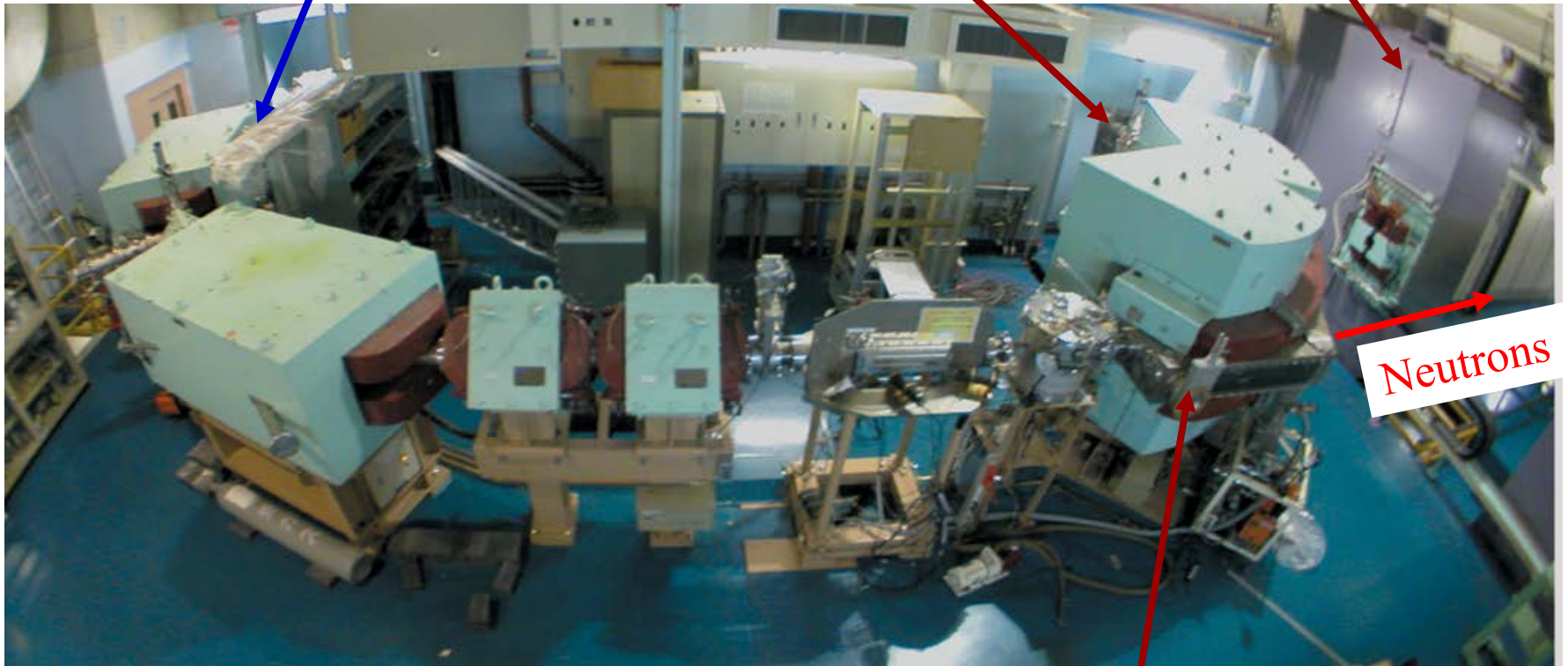
1.5 m Shielding wall
(movable)

n-Hall@RCNP

Proton beam

Beam dump

Shield



Neutrons

⁷Li target

100 MeV以上の中性子強度と純度

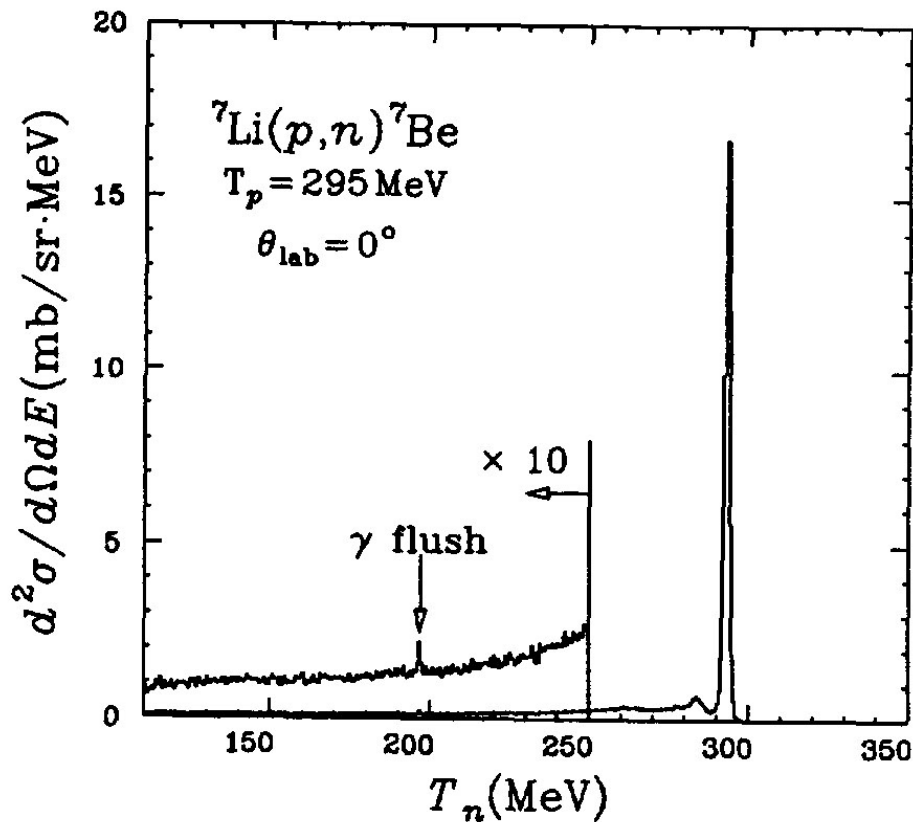


Fig. 11. Neutron energy spectrum for the ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ reaction at 295 MeV and 0° . See text for detail.

H. Sakai et al.,

Nucl. Instr. Meth. A 369 (1996) 120-134

${}^7\text{Li}$ target: 1 cm ($0.535 \text{ g}/\text{cm}^2$)

Proton current: 1 μA

Distance from the target: 8 m



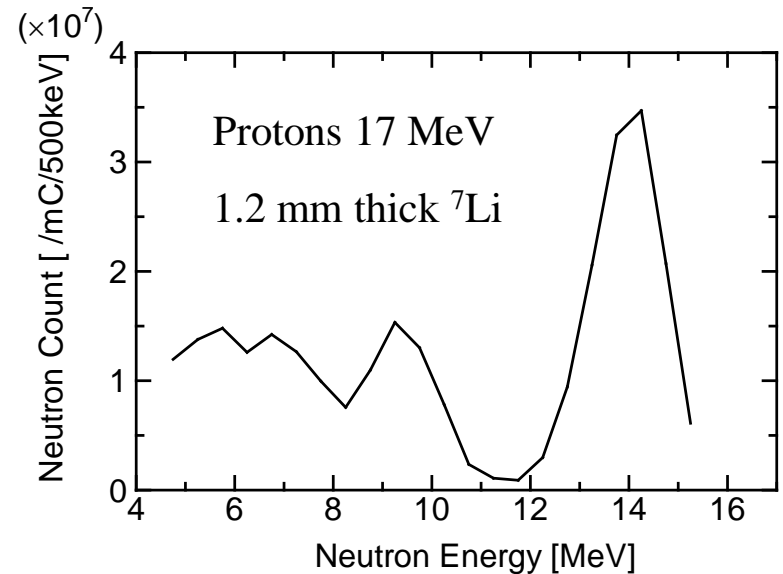
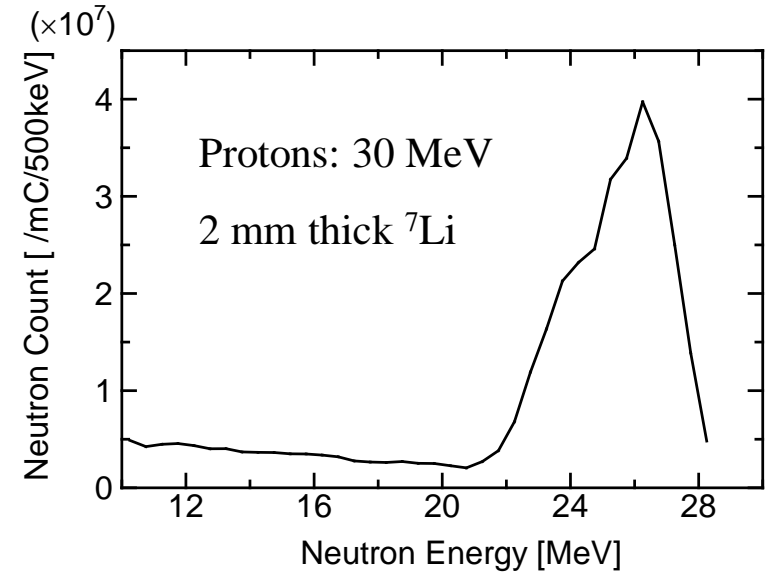
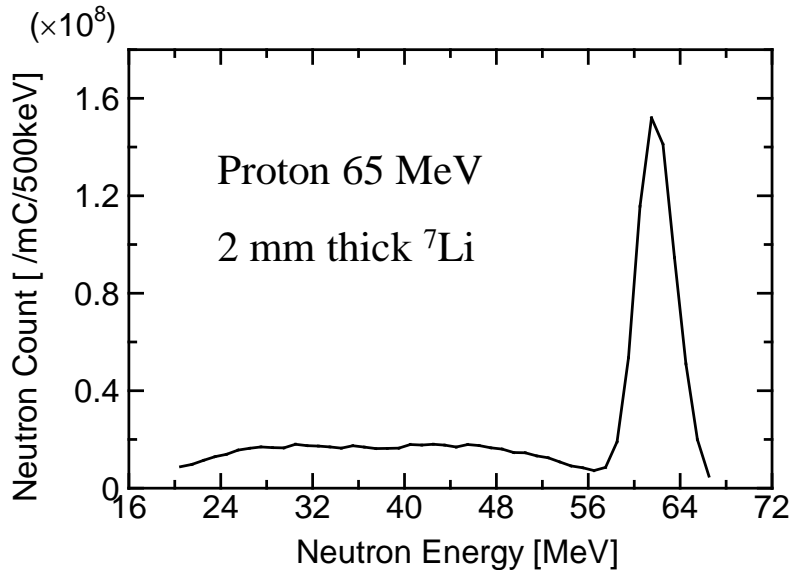
$1.1 \times 10^4 \text{ n}/\text{cm}^2/\text{s}$

peak : tails \doteq 1 : 1

$\Delta E \approx 2 - 5 \text{ MeV}$

低エネルギー中性子の強度と純度

${}^7\text{Li} (p, n) {}^7\text{Be}$



Intensity of neutrons normalized
by the beam current, the target
thickness and the solid angle;

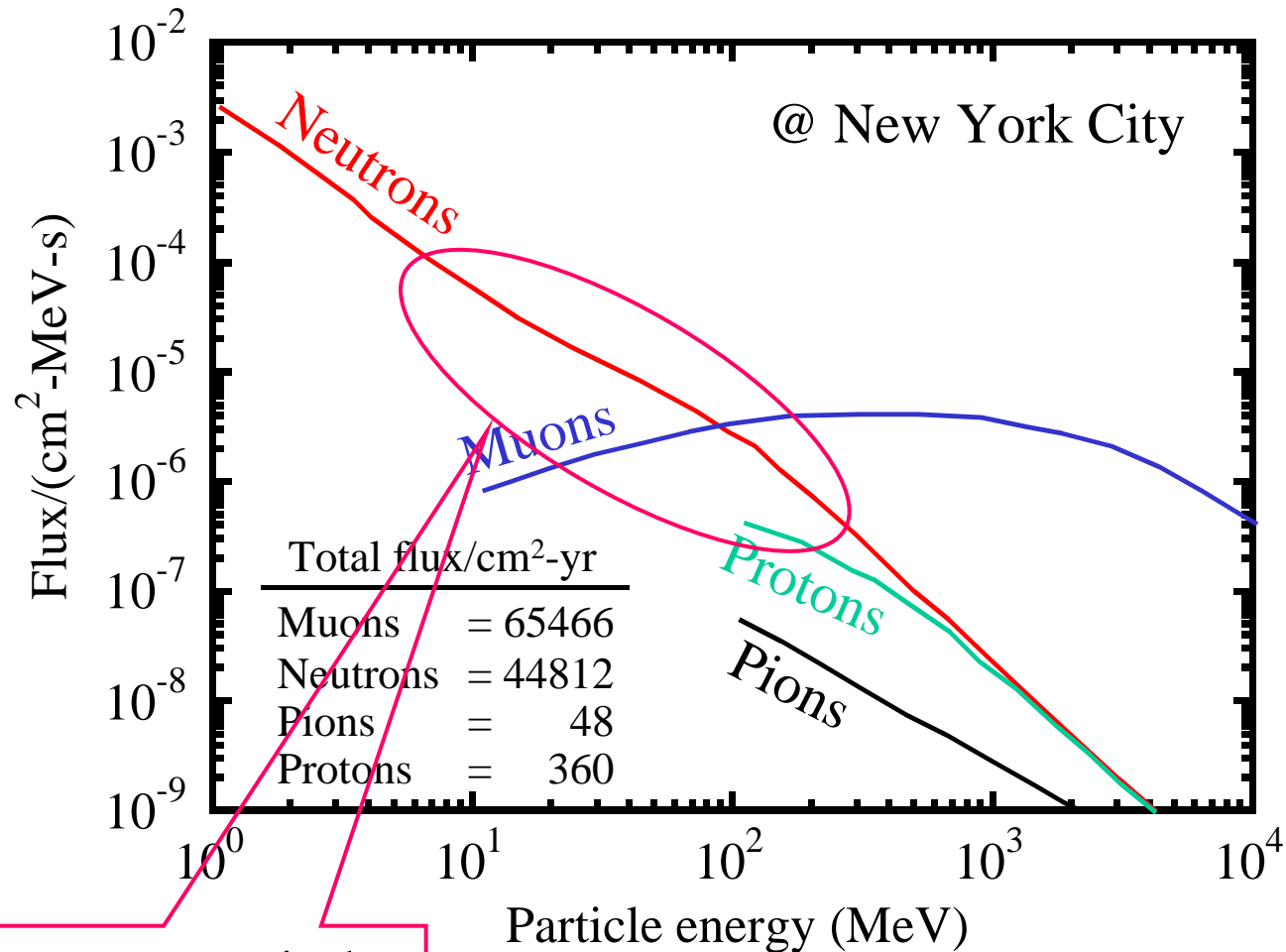
(65 MeV) : (30 MeV) : (17 MeV)

= 1 : 0.21 : 0.11

白色中性子@RCNP

- Study of radiation effects of terrestrial neutrons on LSIs
There are large demands from Industries and Researchers of Information Science and Technology
(Osaka Univ., Kyoto Univ., Kyoto Inst. Tech., etc.)
- Production of radioisotopes for nuclear medicine
 ^{99m}Tc (from ^{99}Mo)

Cosmic rays in the terrestrial environment



High energy neutron is the main source of the soft errors on LSIs on the earth.

Radiation effects on integrated circuits

Average SER (Soft Error Rate) in SRAM $\sim 1,000 \text{ FIT}^*/\text{Mb}$

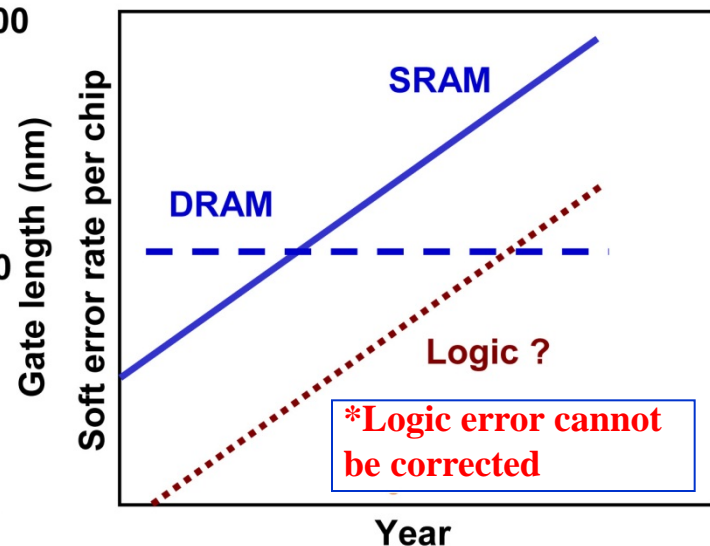
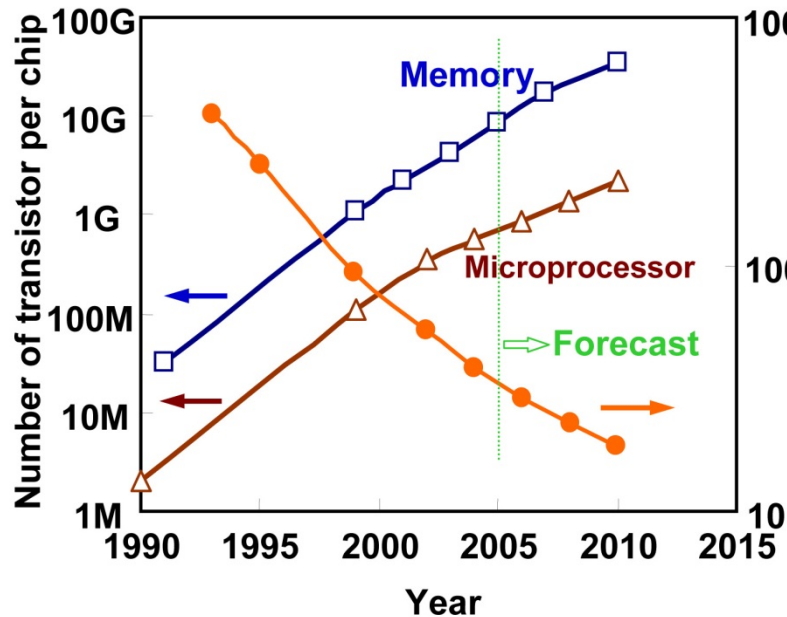
SRAMs in a system (server, etc) $\sim 1\text{Gb}/\text{system}$



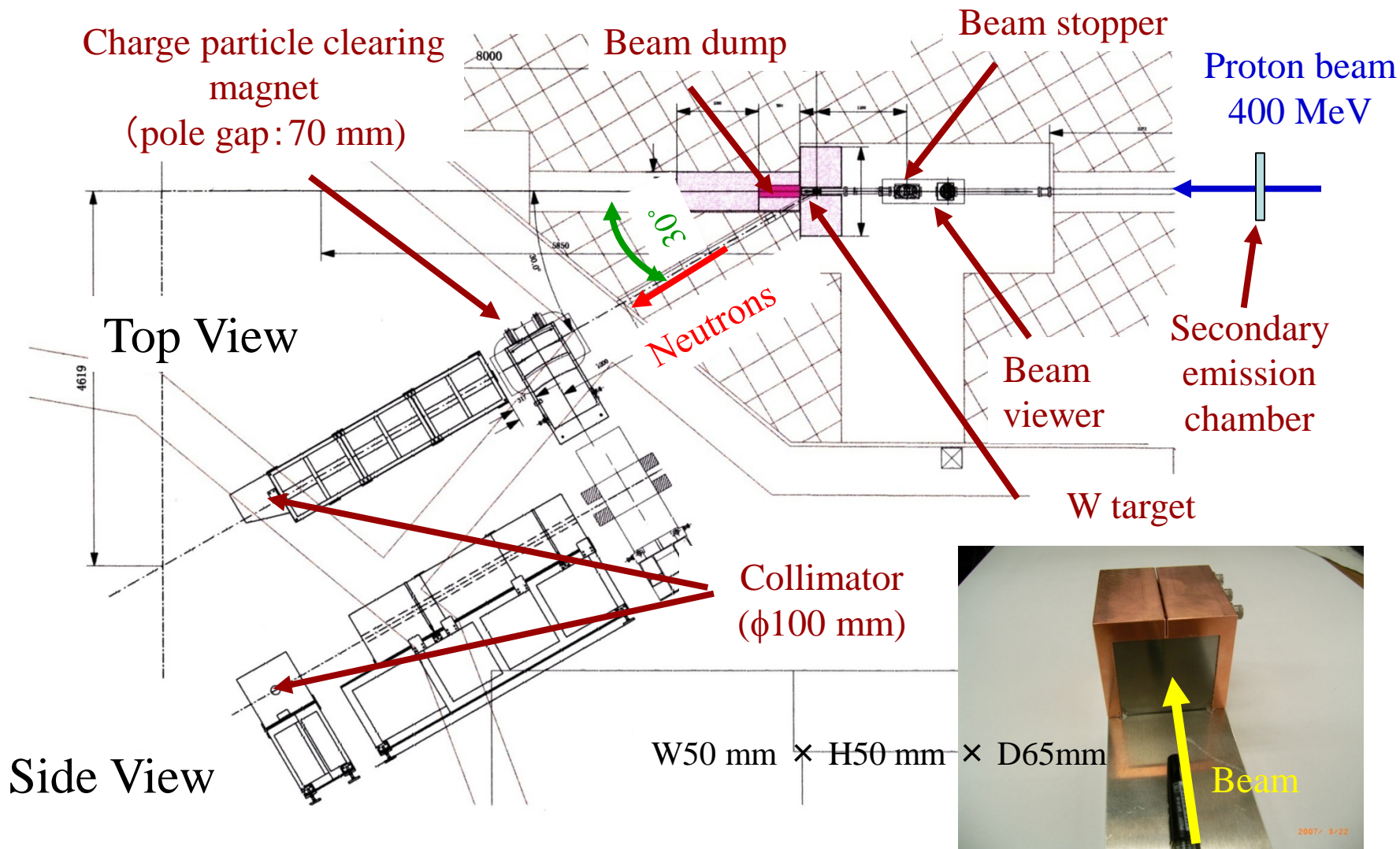
$10^6 \text{ FIT}/\text{system} \sim 10^{-3} \text{ error}/\text{hour}/\text{system}$

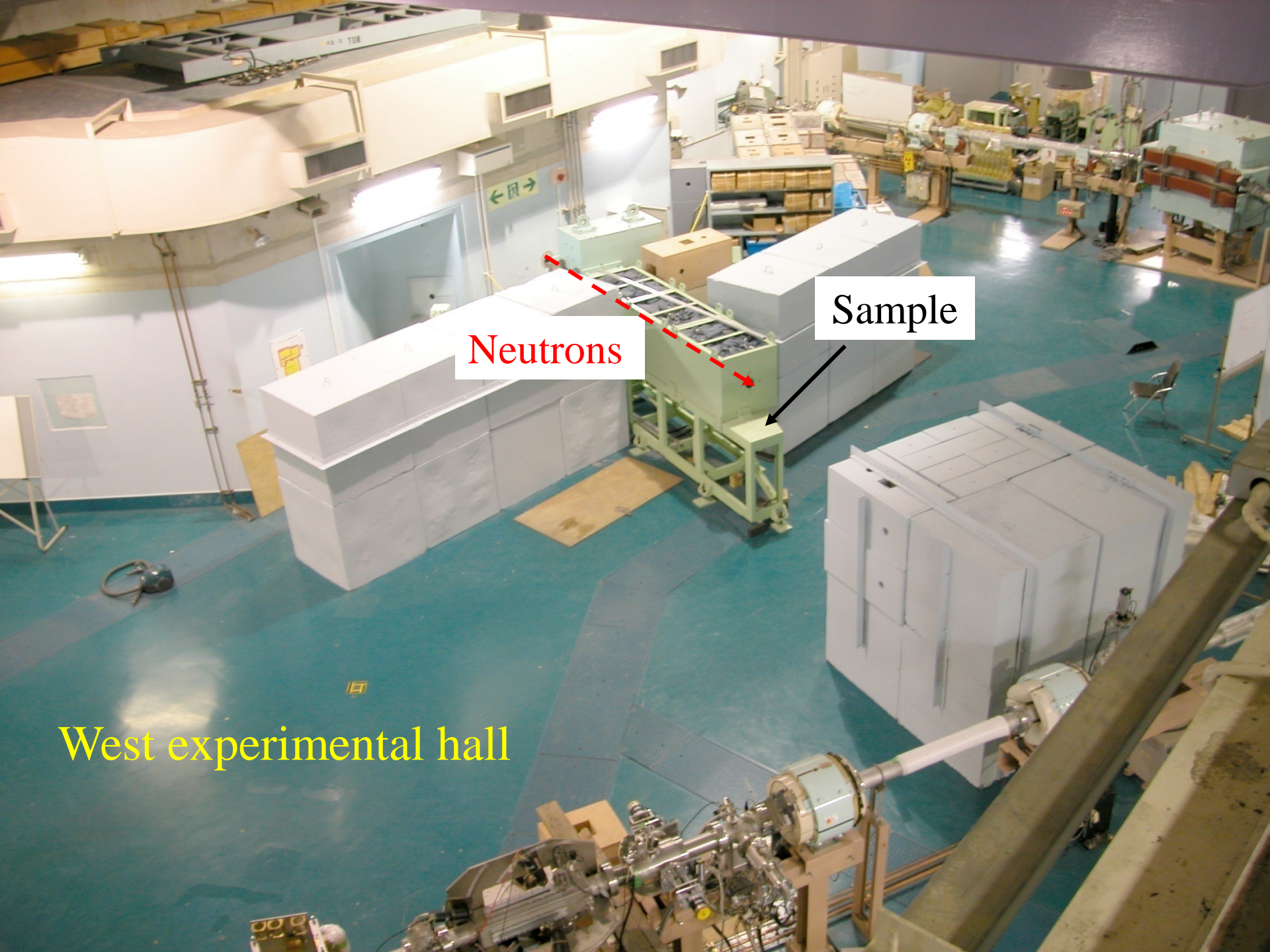
* 1 FIT = 1 error/ 10^9 hours

$\sim 10 \text{ errors}/\text{year}/\text{system}$



白色中性子源@ RCNP



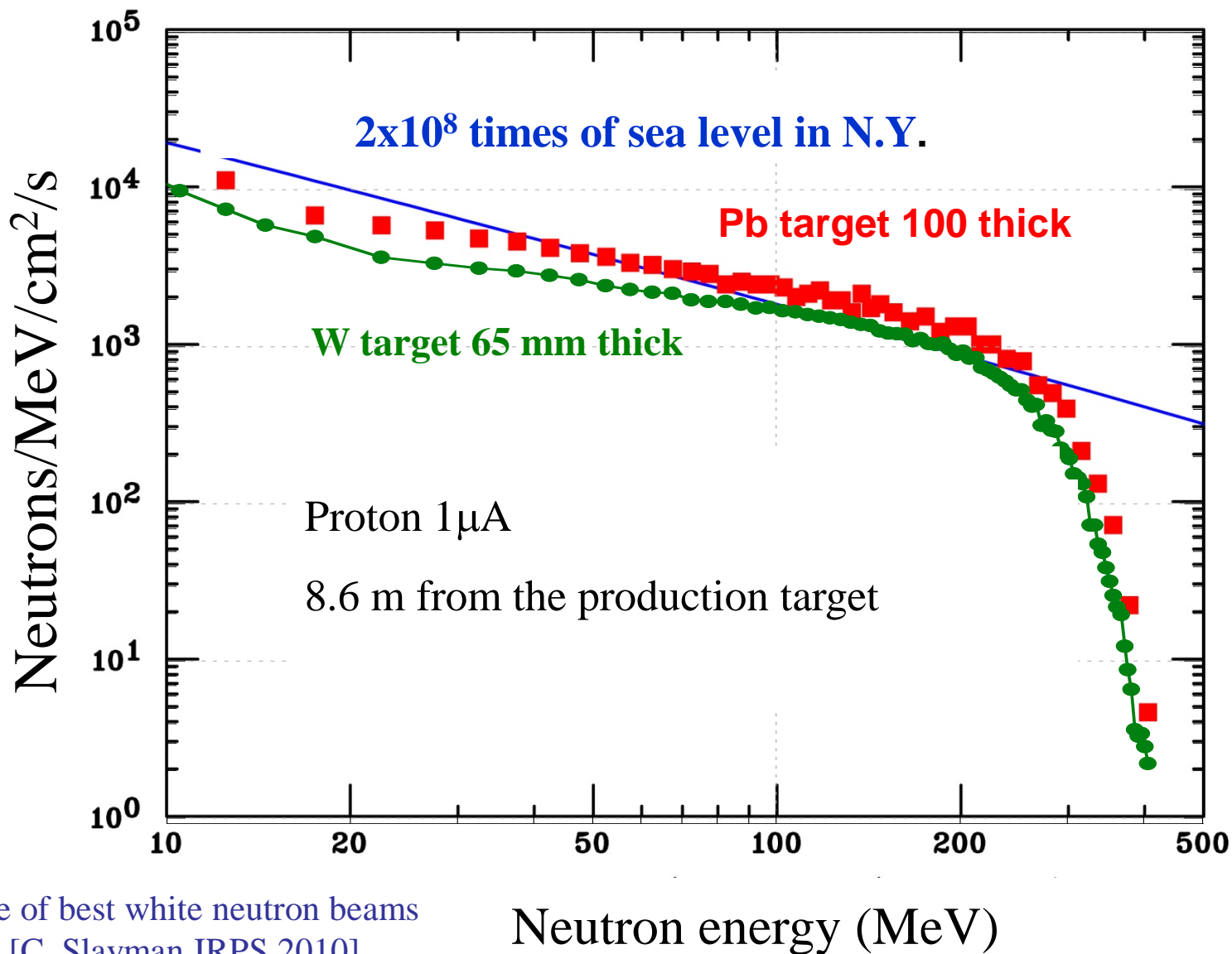


Neutrons

Sample

West experimental hall

白色中性子強度 @ RCNP



RCNP is one of best white neutron beams in the world [C. Slayman IRPS 2010]

まとめ

1. AVFビーム強度（輝度）増強に向けた開発
2. 新入射器の概念設計
3. 中性子源@RCNP と利用

ご清聴ありがとうございました