

# サイクロトロンの小型化とミュオン生成

理化学研究所 仁科加速器科学研究センター  
核変換技術研究開発室  
奥野広樹

# 話の内容

ミュオン生成に求められる加速器の仕様

サイクロトロン の基礎

サイクロトロンによるミュオン生成

CARAによるミュオン生成

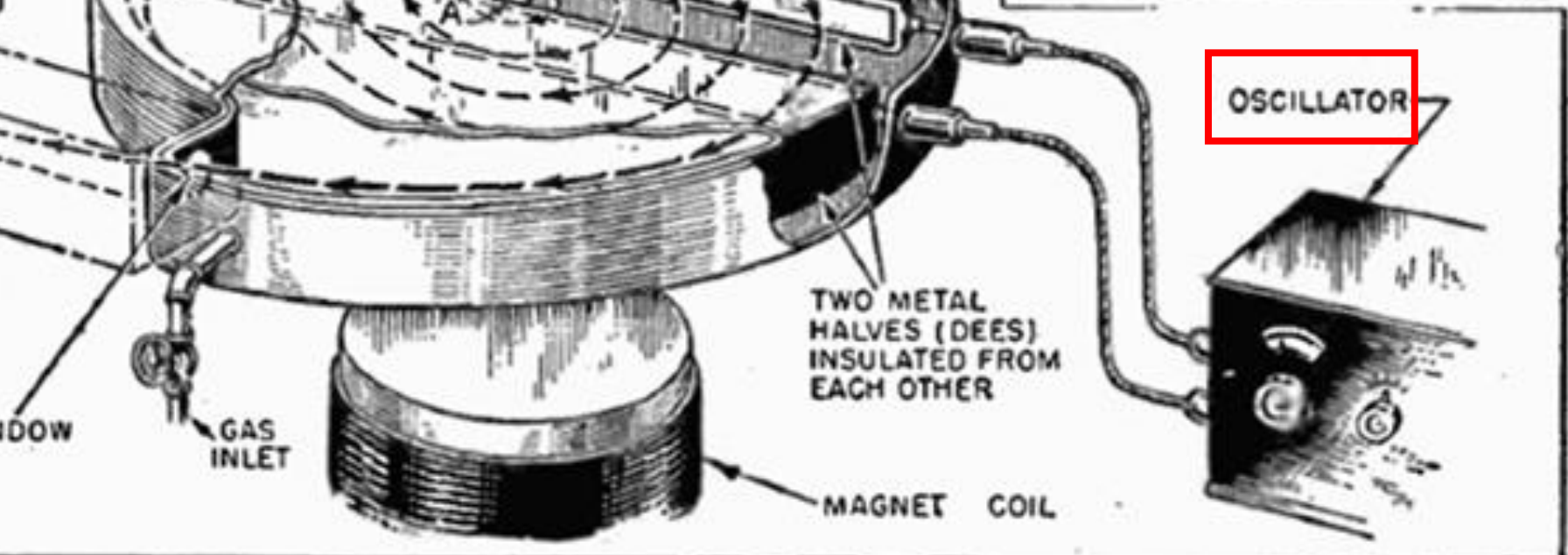
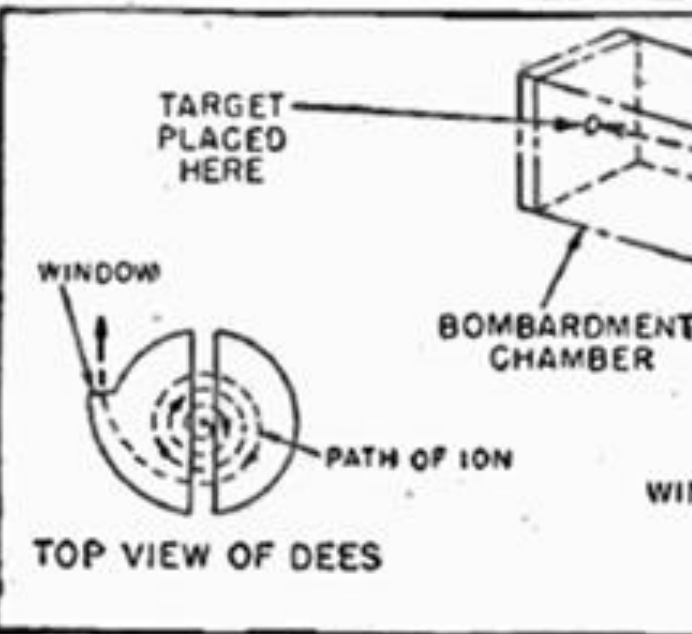
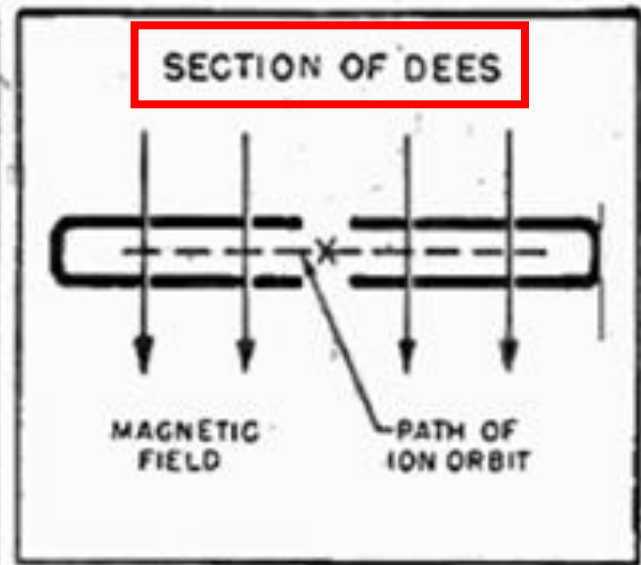
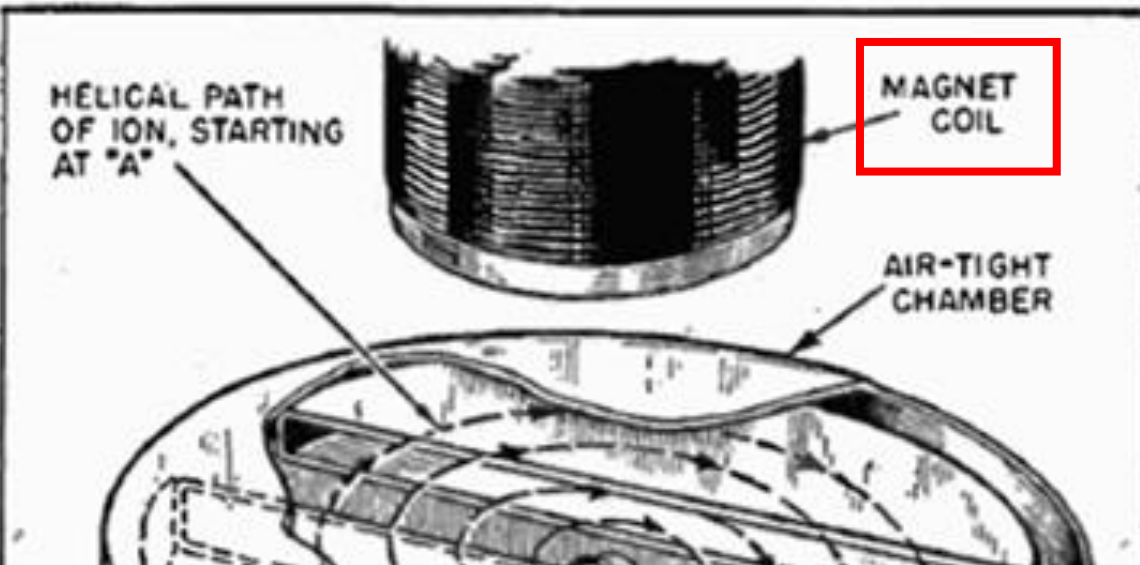
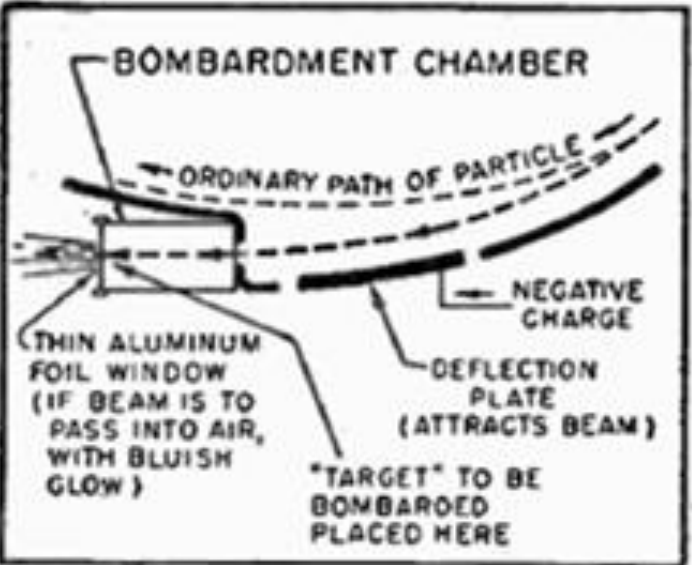
MERITによるミュオン生成

今後の展望

# ミュオン生成に求められる加速器の仕様

- 400 MeV
- 陽子
- 平均電流値 1 $\mu$ A
- **パルス(1/1000ほどのデューティ?)**

# サイクロトロンの基礎



## Ernest Orlando Lawrence



Taken from  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Ernest\\_Lawrence](https://en.wikipedia.org/wiki/Ernest_Lawrence)

Taken from  
<https://www2.lbl.gov/Science-Articles/Archive/rev-idea.html>

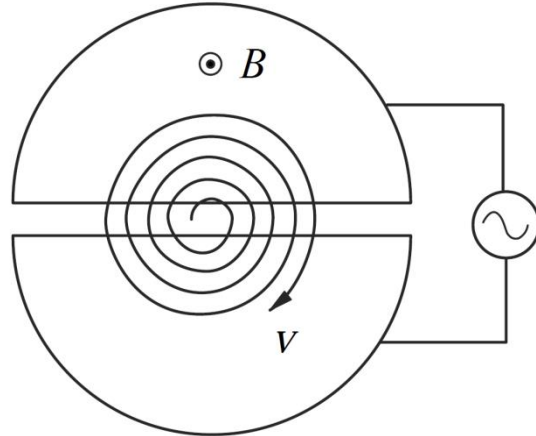


**The 4 inch  
80-keV H<sub>2</sub><sup>+</sup>, 1931**

**The 11 inch  
1.1-MeV proton, 1932**



Magnet poles



D-electrodes

$$V = V_D \cos \omega_D t$$

(Cyclotron frequency)

$$qvB = \frac{mv^2}{\rho}$$

$$\omega = \frac{v}{\rho} = \frac{qB}{m}$$

**Cyclotron is a resonance phenomenon.**

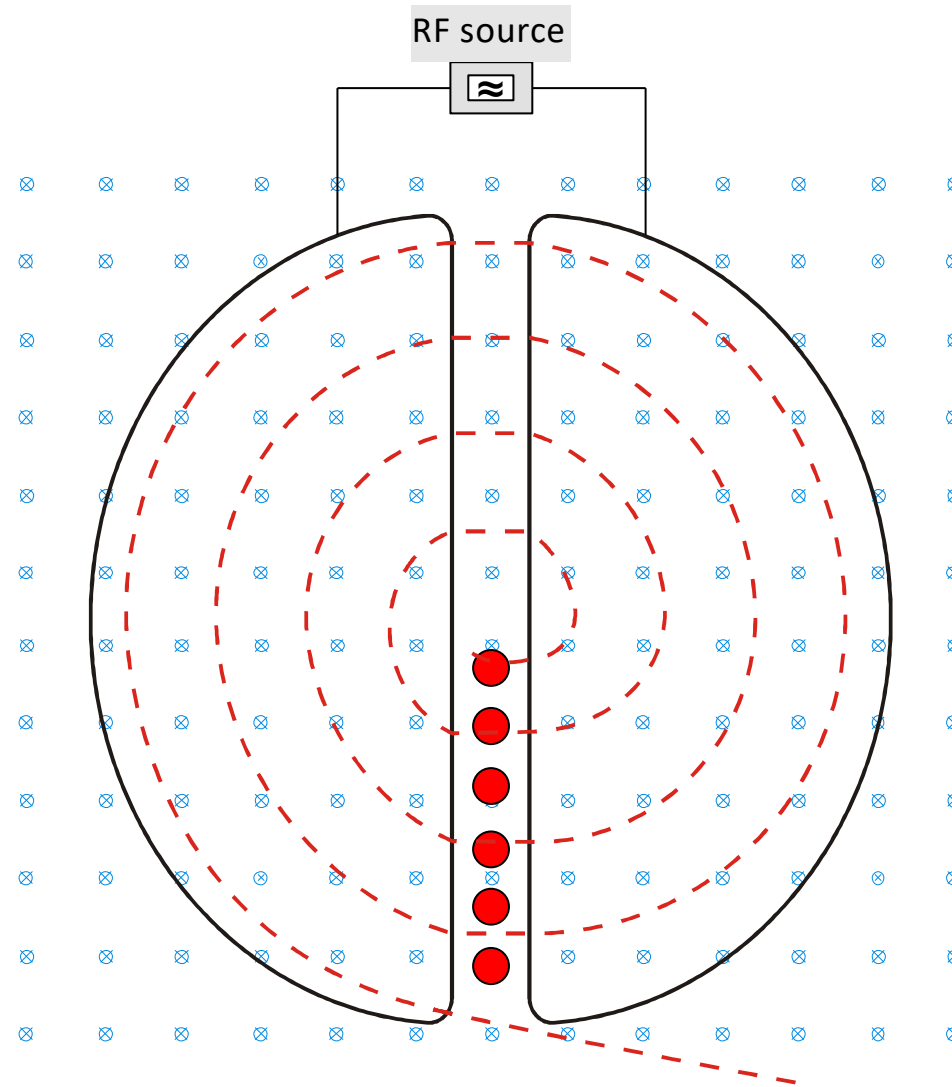
**Resonance condition**

$$\omega_D = \omega \quad (\text{Cyclotron frequency})$$

**Successive acceleration occurs.**

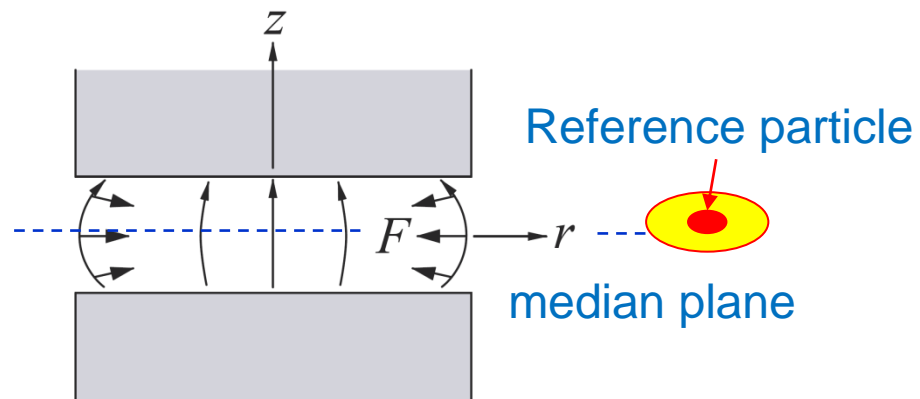
**Particles reach periphery.**

The *cyclotron frequency* of a non-relativistic particle is independent of the particle velocity



ほうきで掃くような加速





## Vertical Focusing

$$\begin{aligned}
 F_z &= qv_\theta B_r \\
 &= qv_\theta \frac{\partial B_r}{\partial z} z = qv_\theta \frac{\partial B_z}{\partial r} z \quad \left( \leftarrow \nabla \times \vec{B} = 0 \right) \\
 &= q\omega r \frac{\partial B_z}{\partial r} z = m\omega^2 \frac{r}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial r} z \\
 &= m\omega^2 \mu' z
 \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a new parameter } \mu' \\ \mu' \equiv \frac{r}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial r} = -n \end{array} \right.$$

→ simple harmonic motion

## Equation of motion in z direction

$$\frac{d^2 z}{dt^2} - \mu' \omega^2 z = \frac{d^2 z}{dt^2} + \omega_z^2 z = 0$$

z → azimuthal angle  $\theta$  transformation

$$\frac{d^2 z}{d\theta^2} - \mu' z = \frac{d^2 z}{d\theta^2} + \nu_z^2 z = 0$$

a new parameter  $\nu_z$

$$\nu_z = \frac{\omega_z}{\omega} = \sqrt{-\mu'}$$

→ betatron oscillation

$$\mu' < 0 \quad \left( \frac{\partial B_z}{\partial r} < 0 \right)$$

Equation of motion in radial direction

$$-qv_{\theta}B_z = m\left(-\frac{v^2}{r} + \frac{d^2r}{dt^2}\right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B_z(r) = B_z(R) + \frac{\partial B_z}{\partial r}x + \dots \\ X \ll R \end{array} \right.$$

$$-qv_{\theta} \frac{\partial B_z}{\partial r}x = \frac{mv^2x}{R^2} + m \frac{d^2x}{dt^2}$$

Thus, we obtain

$$\frac{d^2x}{d\theta^2} + (1 + \mu')x = \frac{d^2x}{d\theta^2} + v_r^2x = 0$$

betatron oscillation is:

$$v_r = \frac{\omega_r}{\omega} = \sqrt{1 + \mu'}$$

$$\mu' > -1 \quad \left(\frac{r}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial r} > -1\right)$$

Weak convergence condition

$$-1 < \mu' < 0$$

Z方向、R方向ともに収束

# Cyclotron principle

## Isochronism

- phase stability of beam acceleration

## Beam convergence

- vertical focusing

**Classical cyclotrons** - weak convergence

relativistic effect

→ Increasing radially magnetic field

→ causes the axial defocusing

Limitations: relativistic effects break the isochronism

→  $E_{pmax} \approx 12 \text{ MeV}$

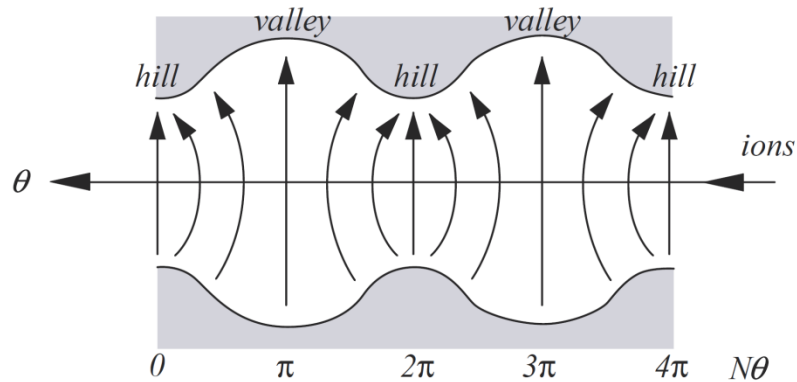
a new parameter  $\mu'$

$$\mu' \equiv \frac{r}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial r} = -n$$

$z \rightarrow$  azimuthal angle  $\theta$  transformation

$$\frac{d^2 z}{d\theta^2} - \mu' z = \frac{d^2 z}{d\theta^2} + \nu_z^2 z = 0$$

Increasing radially magnetic field causes the axial defocusing. It is solved by provided magnetic field **Azimuthally Varying Field (AVF)**



radial velocity & B as azimuth angle

$$v_r = \omega \frac{dx}{d\theta} = -\frac{\omega f R}{N} \sin N\theta$$

$$B_\theta = \frac{\partial B_\theta}{\partial z} z = \frac{\partial B_z}{R \partial \theta} z = -z \frac{\bar{B} f N}{R} \sin N\theta$$

$$(\nabla \times \vec{B} = 0)$$

**Azimuthally Varying Field**

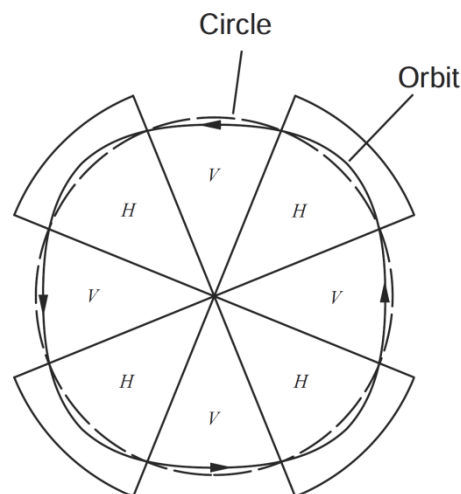
$$B_z = \bar{B}(1 + f \cos N\theta)$$

particle motion at  $x_f$  from  $R$

$$-qv\bar{B}f \cos N\theta = m \ddot{x}_f$$

$$\rightarrow x_f = \frac{fR}{N^2} \cos N\theta$$

Incident angle



**focusing force in z direction**

$$F_z = -qv_r B_\theta = -m\omega^2 f^2 z \sin^2 N\theta$$

- always makes strong focusing
- Edge focusing

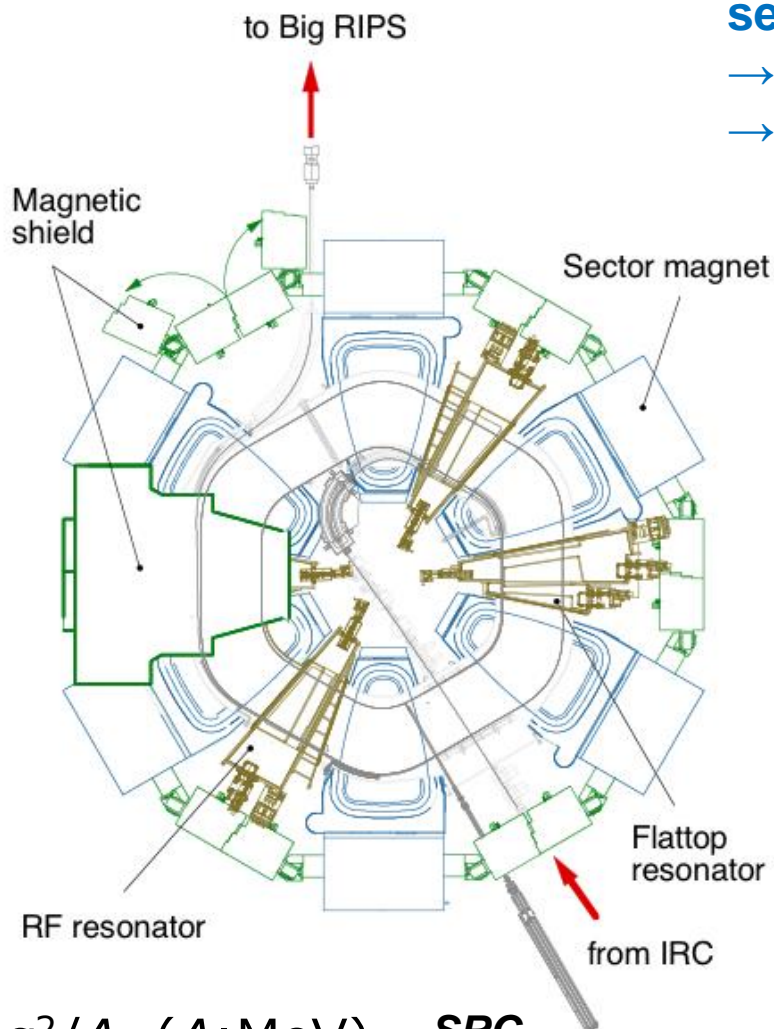
Classical Cyclotron



AVFCyclotron



Higher energies – Ring Cyclotron



sector magnet structure  
 → deep hill/valley  
 → stronger edge focusing



**K value**

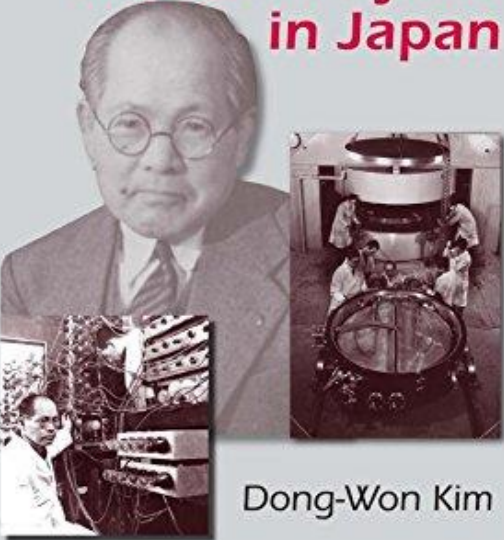
$$E = K \cdot q^2 / A \quad (\text{A} \cdot \text{MeV}) \quad \text{SRC}$$

K-value	2,600 MeV
No. of sectors	6
Extraction radius	5.36 m
Max. mag. field	3.8 T
No. of resonators	4
Magnet weight	8,100 t
Superconducting	

Copyrighted Material

## Yoshio Nishina

### Father of Modern Physics in Japan



Dong-Won Kim

1921, Europe (e.g., Copenhagen)

1928, Klein-Nishina Formula

1929, returned to Japan

1931, Chief Scientist

1937, 1<sup>st</sup> cyclotron

2006, RIKEN Nishina Center established



Shinichiro Tomonaga  
1906–1979



Hideki Yukawa  
1907–1981

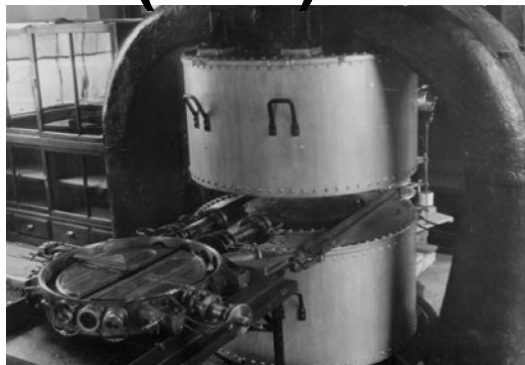


Yoshio Nishina and Hideki Yukawa

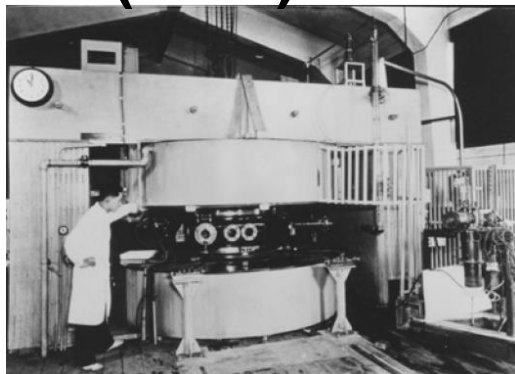


Large cyclotron

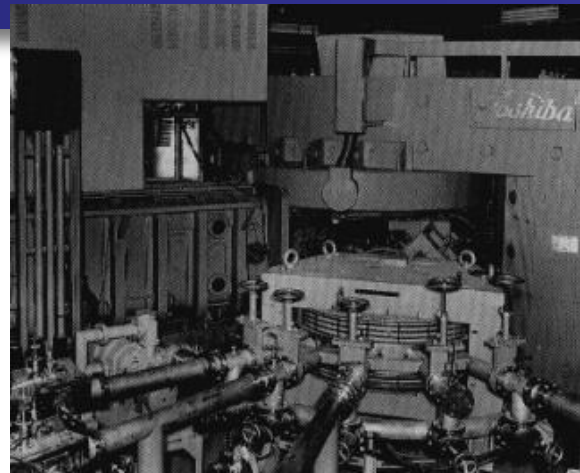
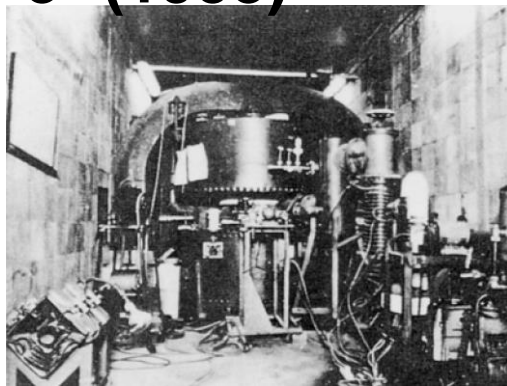
**1<sup>st</sup> (1937)**



**2<sup>nd</sup> (1943)**



**3<sup>rd</sup> (1953)**



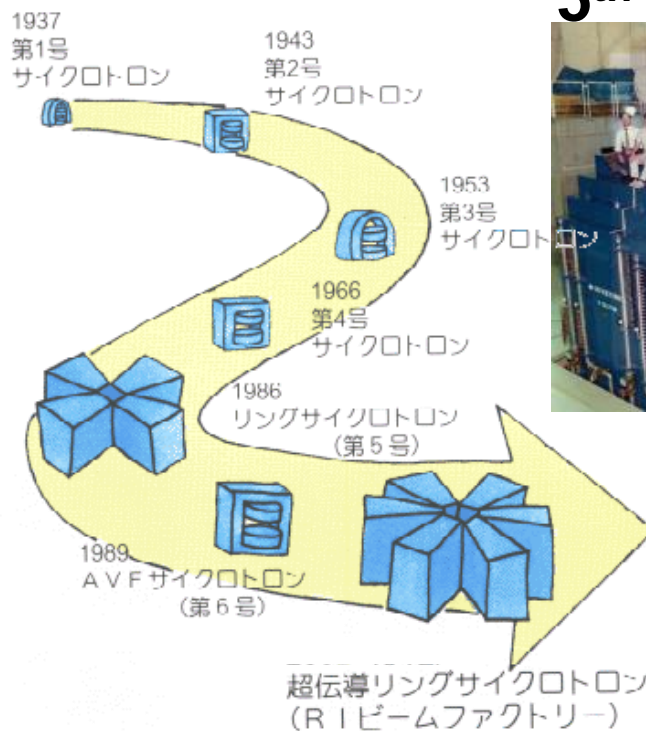
**4<sup>th</sup> (1966)**

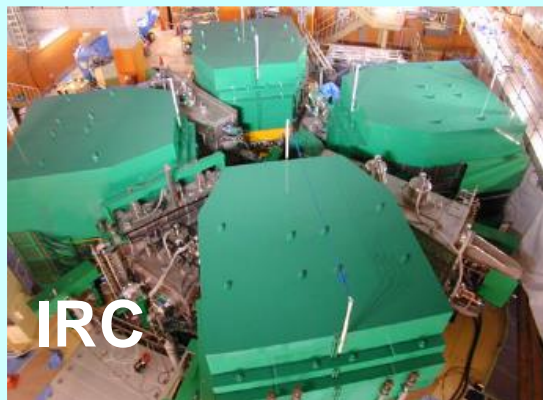


**5<sup>th</sup> (RRC)**



**6<sup>th</sup> (AVF)**

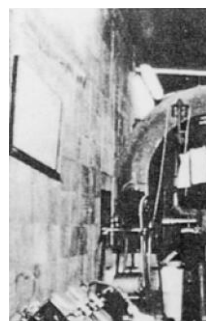




IRC



fRC



SRC

K=2500  
Weight=8300Ton

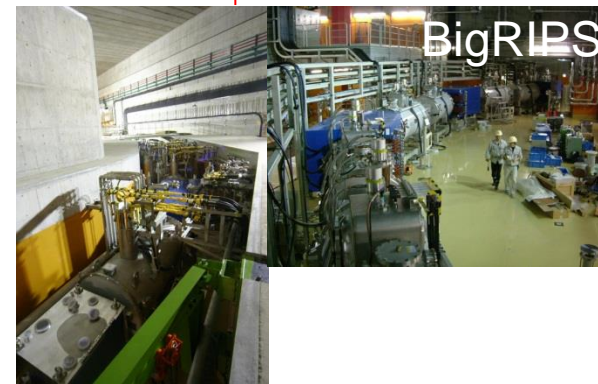
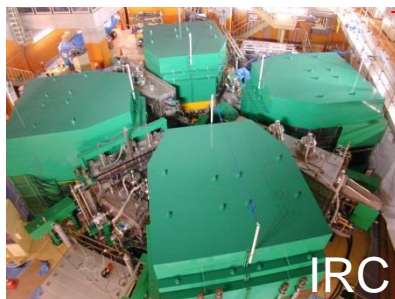
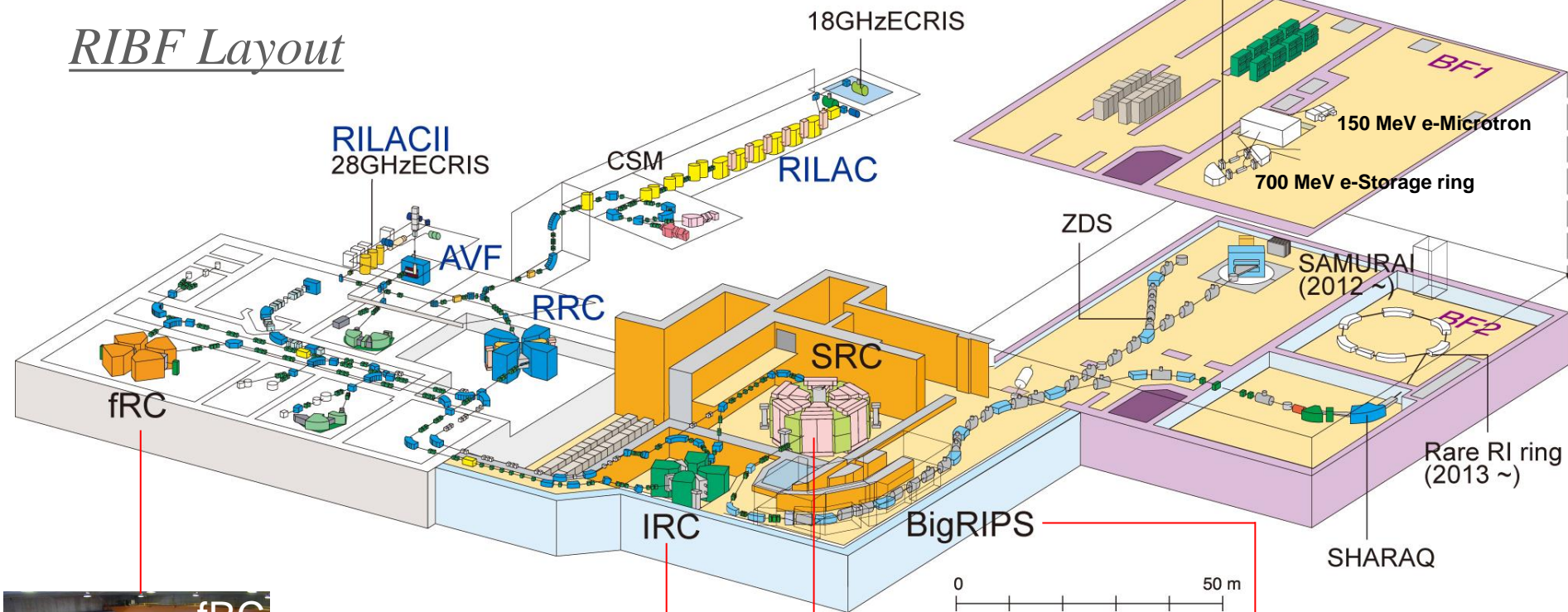




**SRC: 345 MeV/u**

**BigRIPS: RI beams via In-flight U Fission or P. F.**

## *RIBF Layout*

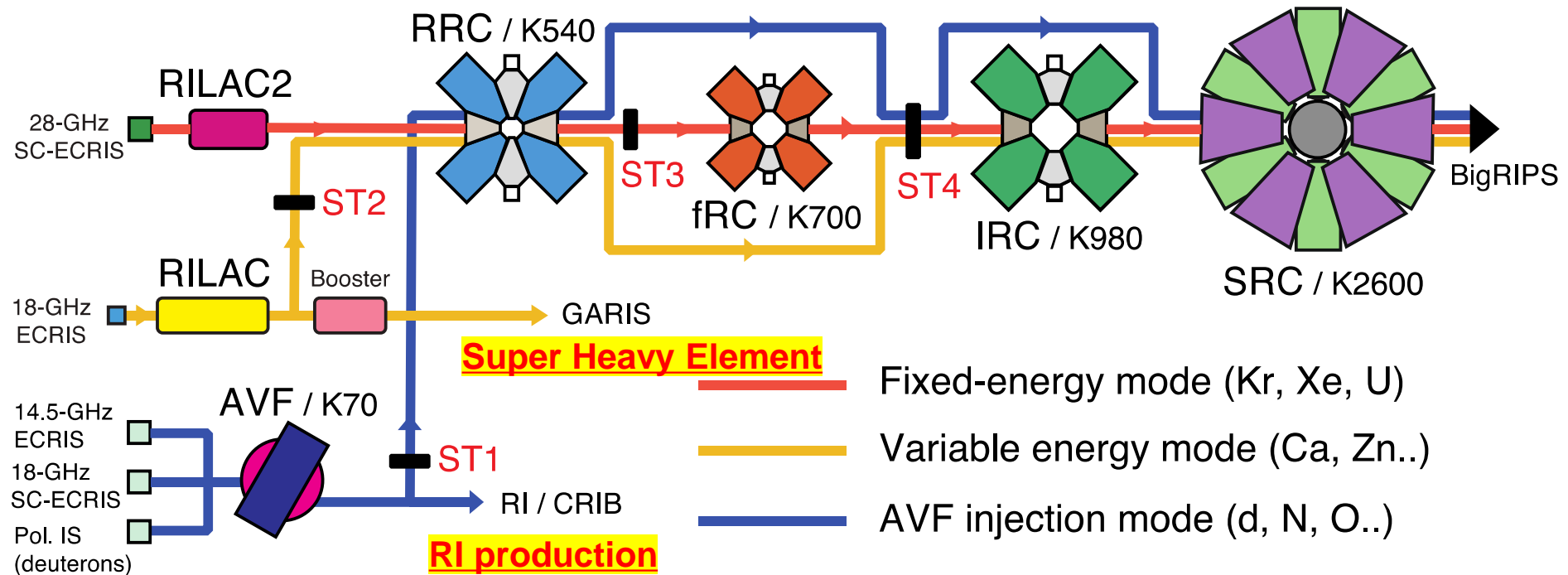


# Acceleration modes

Accelerate ALL ions (from  $H_2^+$  to U), up to 70% of the light speed, in CW mode

3 injectors + 4 booster ring cyclotrons

- 1) AVF-injection mode ( $< 440$  MeV/u) : d, He, O, ...
- 2) Variable-energy mode ( $< 400$  MeV/u) : Ar, Ca, Zn, Kr, ...
- 3) Fixed-energy mode (345 MeV/u) : Xe, U ...



STn: charge stripper

# Specifications of RIBF ring cyclotrons

Challenging

	RRC (1986~)	fRC	IRC	SRC
K-number (MeV)	540	700	980	2600
R <sub>inj</sub> (cm)	89	156	277	356
R <sub>ext</sub> (cm)	356	330	415	536
Weight (tons)	2400	1300	2900	8300
Sector magnets	4	4	4	6
Number of trim coils (/ main coil)	26	10	20	4 (SC) 22 (NC)
Trim coil currents (A)	600	200	600	3000 (SC) 1200 (NC)
RF resonators	2	2+FT	2+FT	4+FT
Frequency range (MHz)	18~38	54.75	18~38	18~38
Acceleration voltage (MV)*	0.28	0.8	1.1	2.0
Turn separation (cm)*	0.7	1.3	1.3	1.8



\*uranium acceleration

SC : superconducting, NC : normal conducting, FT : flattop resonator

# サイクロトロンによるミュオン生成

- 日本での先輩: RCNPのミュオン施設  
**AVFサイクロトロン+リングサイクロトロン**
- 海外での先輩: PSI、TRIUMF

概要	性能 (AVF)	性能 (リングサイクロトロン)	加速実績
----	----------	-----------------	------

## AVF サイクロトロン



## リングサイクロトロン



RCNP加速器施設には、2つの可変エネルギー多粒子サイクロトロンのサイクロトロンカスケードがあります。

- K140AVFサイクロトロン (1973年より稼働)
- K400リングサイクロトロン (1991年より稼働)

リングサイクロトロンの最大加速エネルギーは、陽子で420MeV、重イオンで核子あたり100のMeVです。様々なイオンビームが原子核物理学、核化学やその他の学際分野での研究に利用されます。AVFサイクロトロンは、リングサイクロトロンの入射器として使用されるほか、スタンドアロンモードでも使用されます。

エネルギー広がり( $\Delta E/E$ )が $10^{-4}$ に達する超高品質ビームがRCNP加速器施設の特長です。この高品質ビームはリングサイクロトロンのフラットトップ加速システムと磁石冷却水の高度温度制御システムによって実現しています。この高品質ビームとグランドライデンスペクトログラフおよび、分散整合技術により、世界記録エネルギー分解能 $\Delta E/E = 5 \times 10^{-5}$ が達成されました。400 MeVの大強度陽子ビームは超冷中性子源およびMuSICミューオン源に供給されます。重イオンビームはそのまま高品質重イオンビームとして使用する他、ENビームコースで不安定核ビームの生成に使用することもできます。

## 加速器

概要	性能 (AVF)	性能 (リングサイクロトロン)	加速実績
----	----------	-----------------	------

### K140 AVF サイクロトロン

磁石		
ポール径	3300 mm	
ポール間隔	206 ~ 347 mm	
平磁場	1.6 T	
取り出し半径	1000 mm	
トリムコイル	16 pairs	
バレイコイル	3 ~ 5 pairs	
重量	400 tons	
加速系		
ディー電極	Single type with 180 degree spanning angle	
共鳴器	同軸型。可動式ショート板	
周波数	6 ~ 19 MHz	
最大加速電圧	60 kV	
加速ハーモニクス	1, 3	
取り出し方式	静電ディフレクター、弱収束磁気チャンネル	
イオン源		
外部イオン源	原子ビーム式偏極イオン源	
	常伝導および超伝導ECRイオン源	

概要	性能 (AVF)	性能 (リングサイクロトロン)	加速実績
----	----------	-----------------	------

### K400 Ring Cyclotron

磁石		
セクター磁石	6	
ポール間隔	60 mm	
最大磁場	1.75 T	
トリムコイル	36 pairs	
I入射半径	2m	
取り出し半径	4m	
重量	2200 tons	
加速系		
シングルギャップ式	3	
周波数	30~52 MHz	
加速ハーモニクス	6, 10	
最大加速電圧	500 kV	
RFパワー	250 kW/cavity	
フラットトップキャビティー		
シングルギャップ式	1	
FT ハーモニクス	3	
周波数	90~156 MHz	

**重さ: 400ton+220ton=2600ton**



# *If it passes,* やること

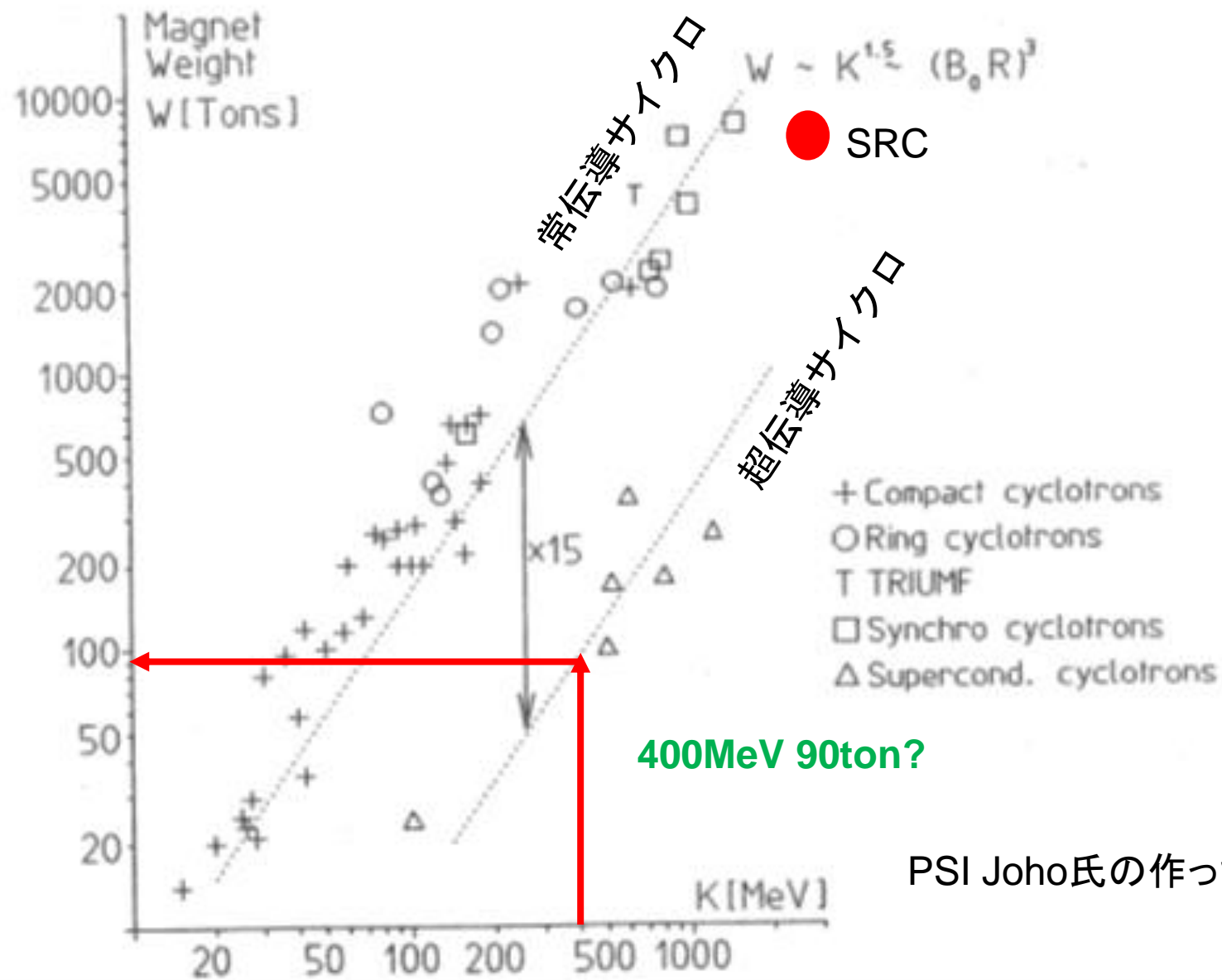
## AVF+RINGで 2600トンからの 小型化

- 小型化という意味では一桁落ちを狙う(260トン程度)
- Johoの公式では超伝導化することによる重量の低減は1/15

## サイクロトロンに パルス化の機 能をつける

- イオン源でのパルス化は避けたい(1 $\mu$ A平均だが1mA最大値のサイクロトロンの中心領域の設計をする必要がある。)
- CWビームを入射して、加速しながらパルス化する円形加速器(ASTOR)





サイクロトロンを超伝導化することにより15倍軽くなる。

SRCの重さは常伝導サイクロ並み

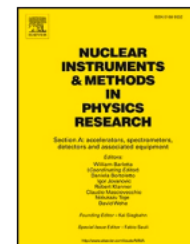
PSI Joho氏の作ったグラフ



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

## Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/nima](http://www.elsevier.com/locate/nima)

Full Length Article

## First beam extraction from a superconducting azimuthally varying field cyclotron for proton therapy



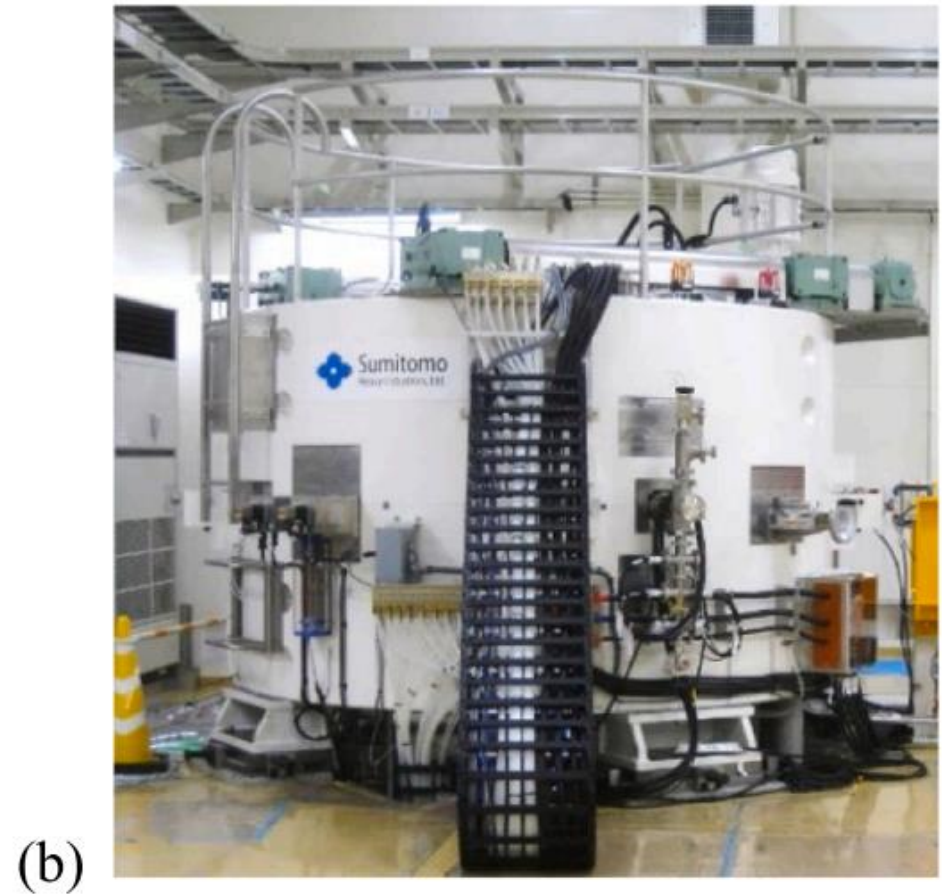
Y. Ebara<sup>\*</sup>, H. Tsutsui, S. Nakajima, S. Hara, S. Nomura, K. Suga, J. Yoshida, K. Taki, H. Murata, N. Takahashi, A. Hashimoto, T. Sakemi, N. Kamiguchi, Y. Arakawa, T. Morie, T. Hirayama, H. Oda, S. Fujita, J. Kanakura, Y. Mikami, T. Tsurudome, T. Miyashita, Y. Kumata

*Sumitomo Heavy Industries, Ltd., ThinkPark Tower, 1-1 Osaki 2-chome, Shinagawa-ku, Tokyo 141-6025, Japan*

## A B S T R A C T

A 230 MeV superconducting azimuthally varying field (AVF) cyclotron SC230 was developed by Sumitomo Heavy Industries Ltd., Japan. With a yoke diameter, height and weight of 2.8 m, 1.7 m and 65 t, respectively, it is currently the most compact isochronous cyclotron for proton therapy. Size reduction was achieved by a high magnetic field using cryogen-free superconducting coils. It adopts not only a superconducting magnet, but also

# SC230



**Fig. 5.** Photographs of the cyclotron (a) carried into the new test site and (b) on the test site.

# SC230

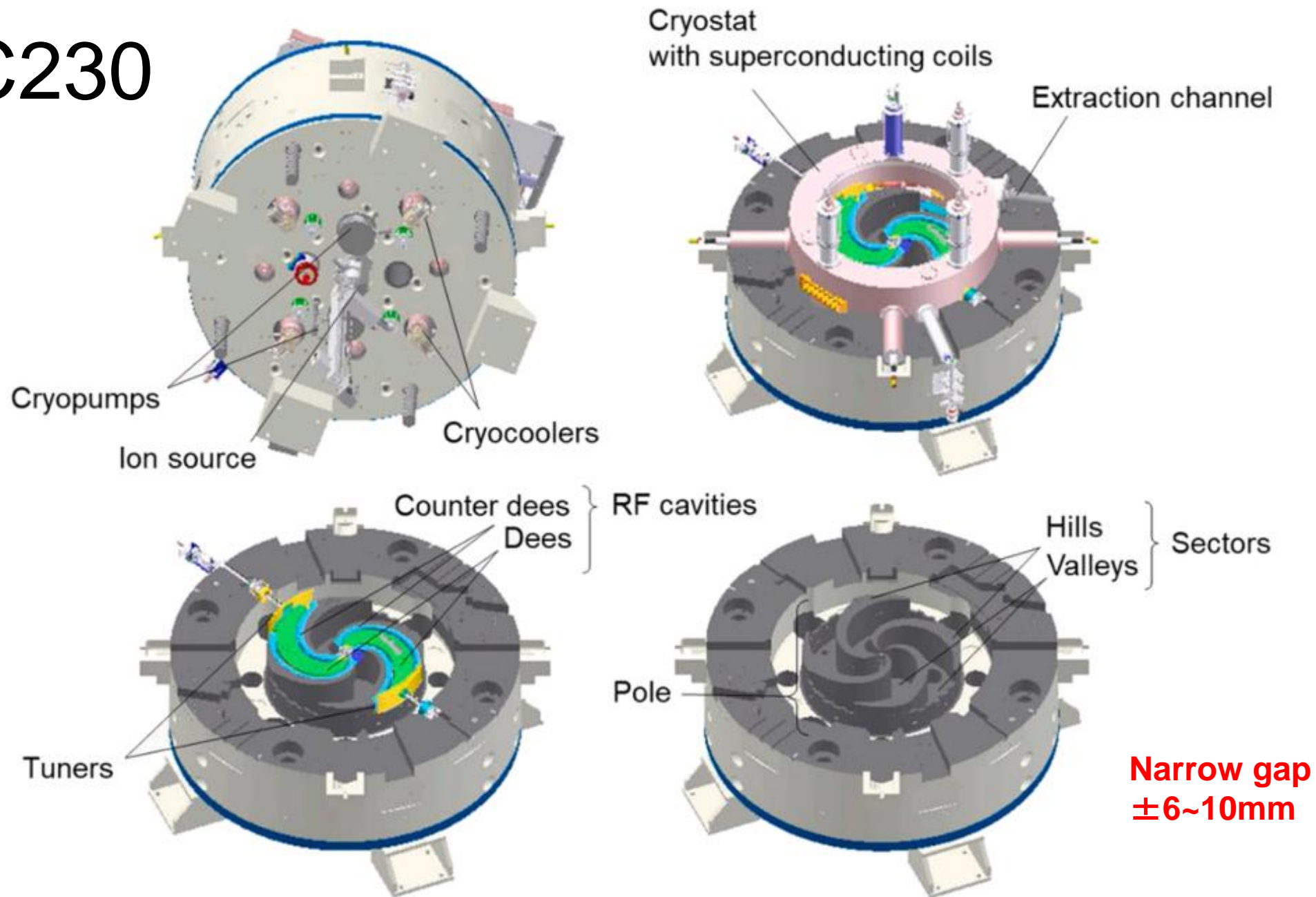
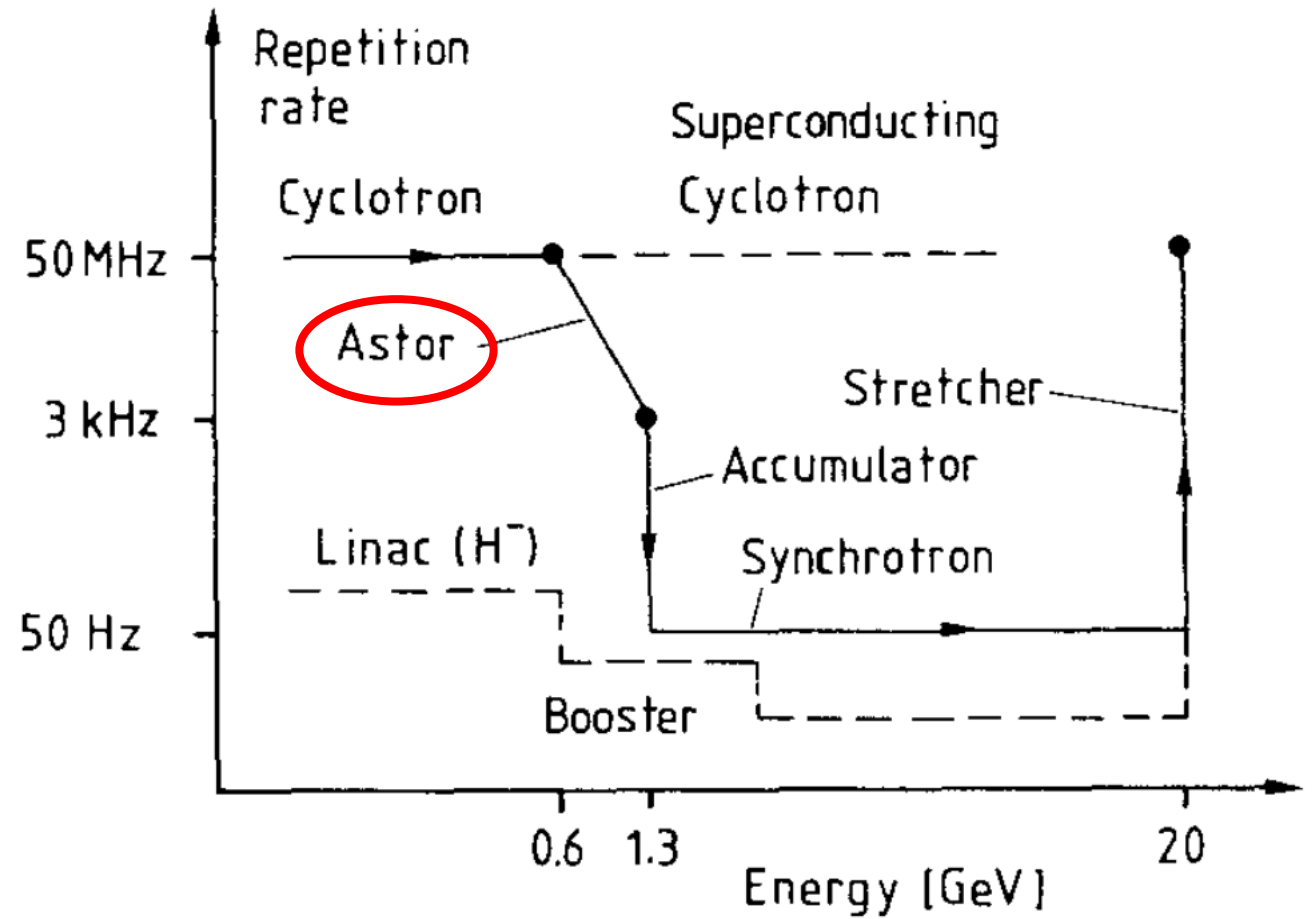


Fig. 2. Schematic view of SC230.

# What is ASTOR? (PSI)

- CWマシン(サイクロトロン)からより高エネルギーが可能なパルスマシン(シンクロトロン)へ接続する為のInterface Machine
- サイクロトロン中の加速電場の半径方向に増加/減少するばあい、ビームの位相が圧縮/拡大する事を利用。



# ASTORの一例

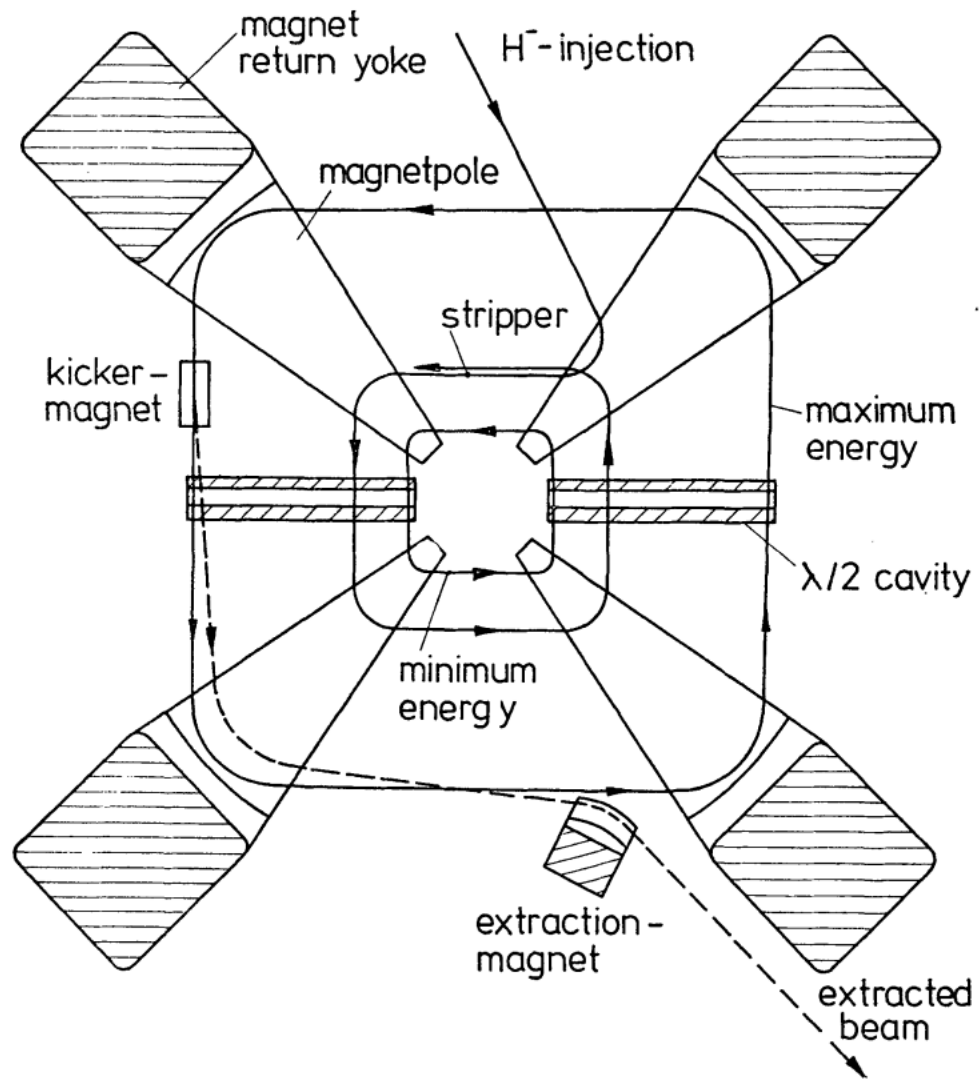


FIGURE 4 Schematic example of a four sector ring cyclotron used as a storage ring.  $H^-$  ions are injected into the

加速方向→

電場↑位相幅↓

電場↓移送幅↑

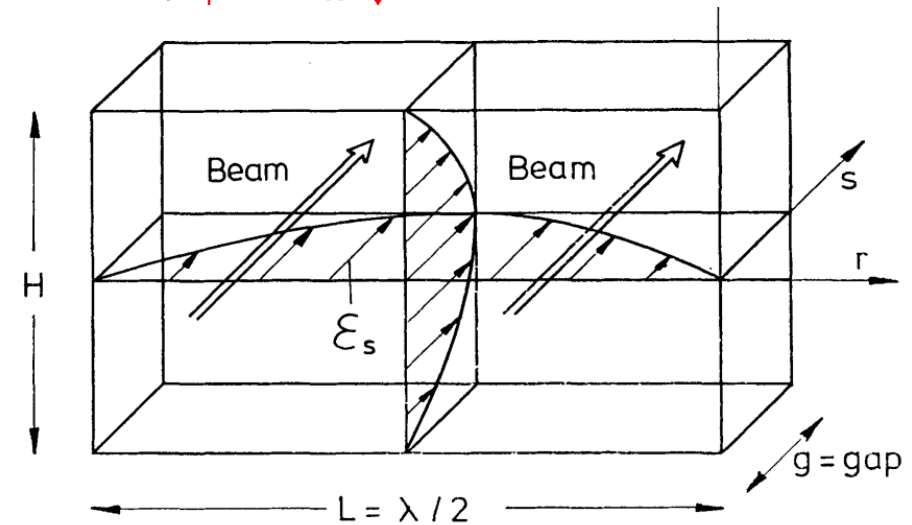
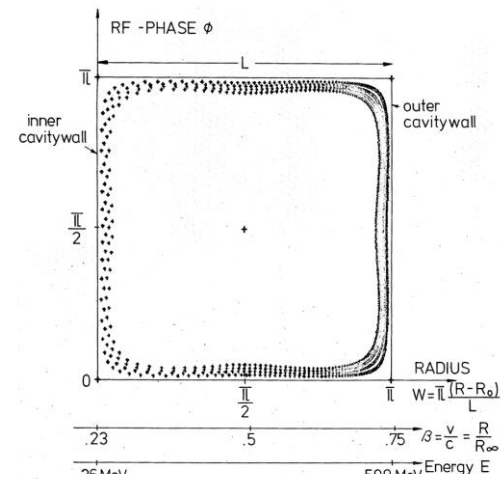
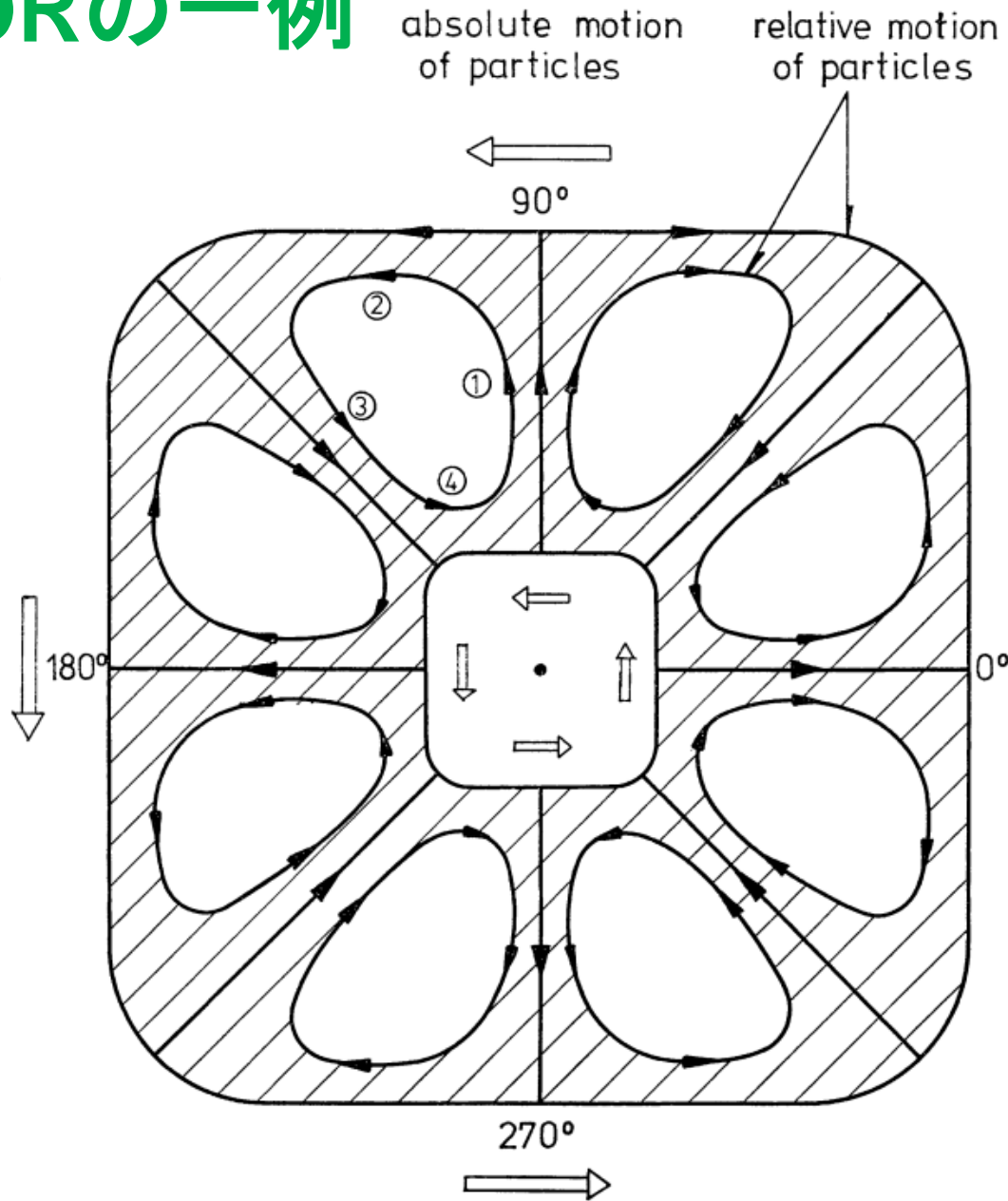
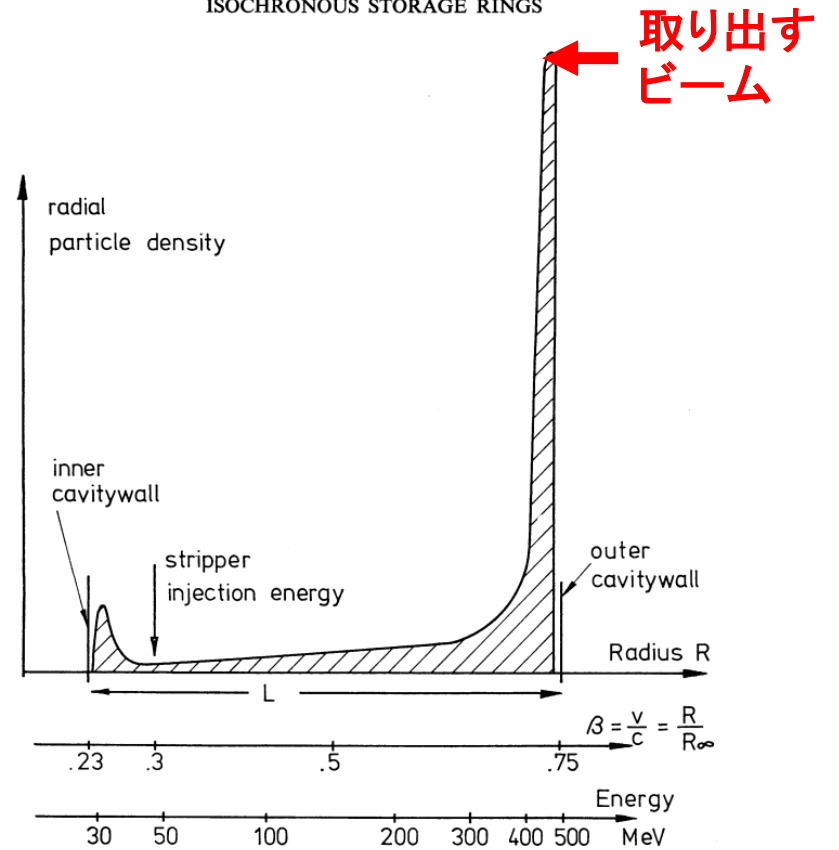


FIGURE 5 Geometry of a rectangular  $\lambda/2$  cavity (SIN cavity operating in the  $H_{101}$ -mode). There is only an electric

# ASTORの一例



ISOCHRONOUS STORAGE RINGS



# ASTORの例2

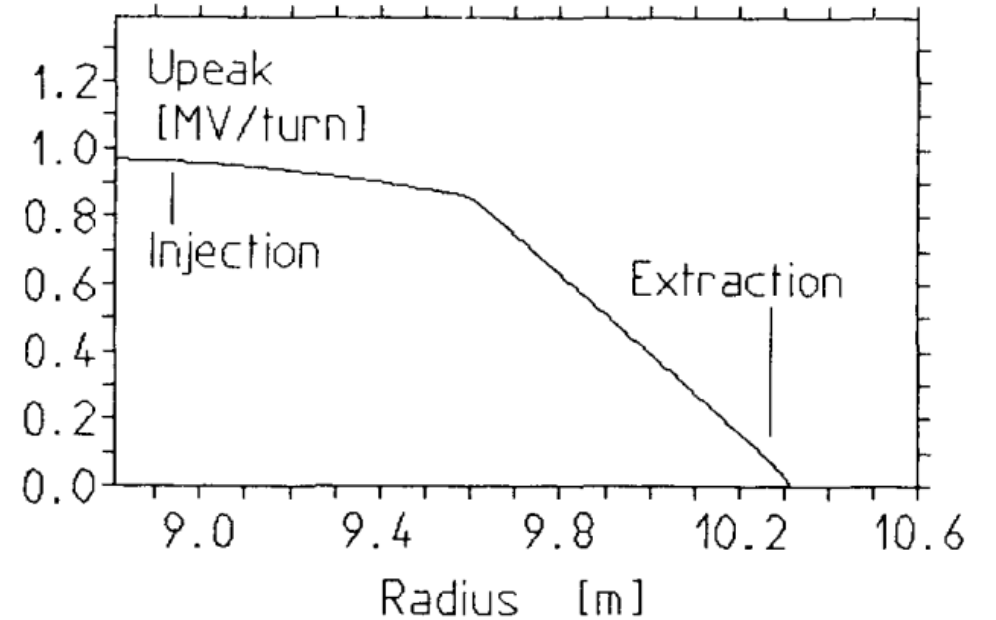
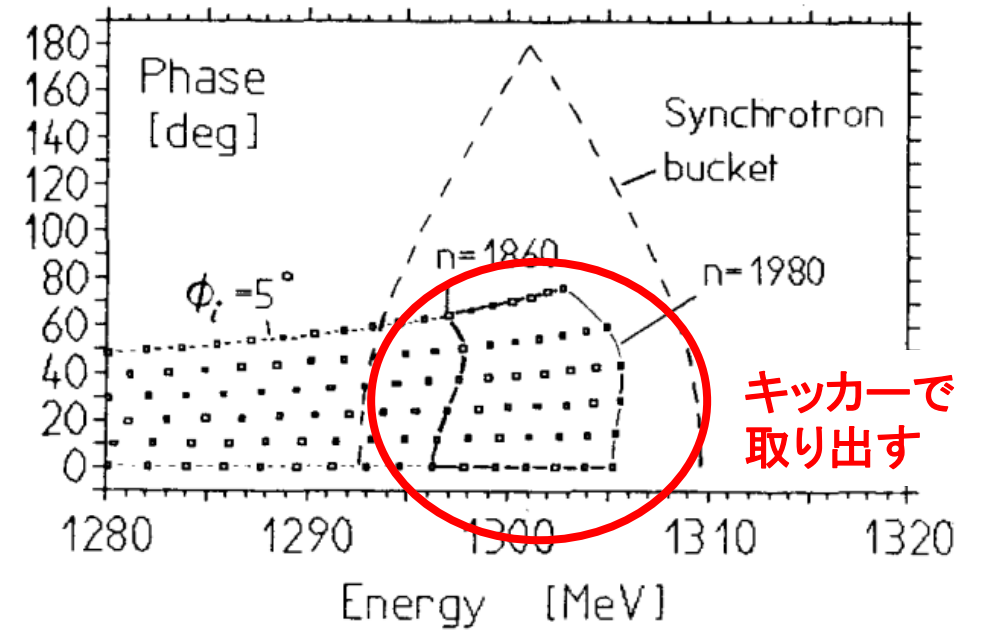
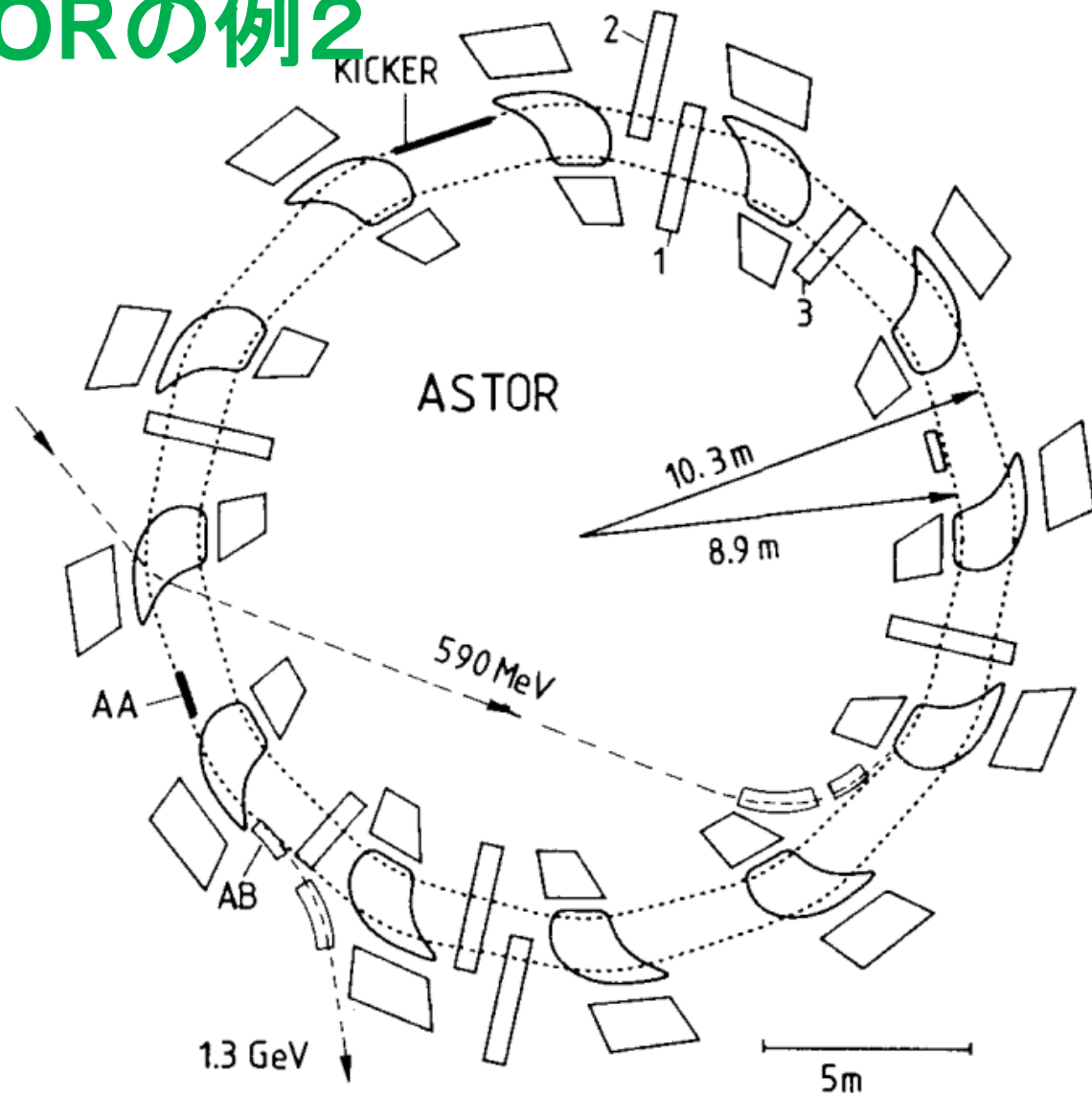


Figure 3: Layout of 1.3 GeV ASTOR. This isochronous cyclotron consists of 12 sector magnets and 8 RF cavities of 3 different types.



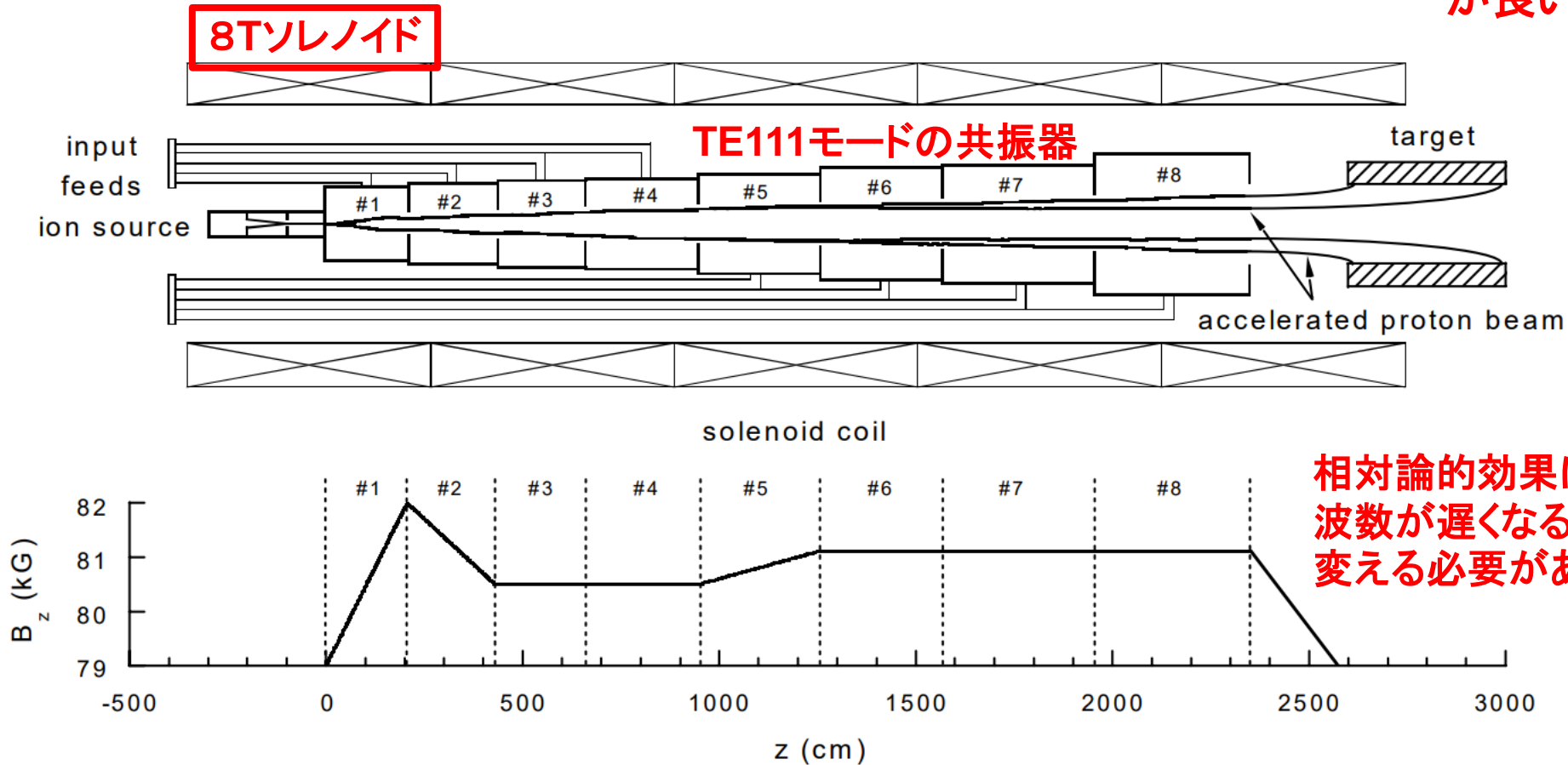
# サイクロトロンのおまとめ

- 案1: SC230+Compact ASTOR (50点)
- 案2: ASTORの機能のついたSC400 (100点)

# CARA (Cyclotron Auto-resonance Accelerator) によるミュオン生成

パルスで平均電流1Aと言っている

パイオン捕獲とマッチング  
が良いか？(要検討)

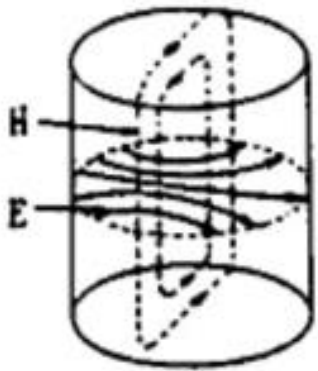


相対論的効果によって、サイクロトロン周波数が遅くなる。これに対応して周波数を変える必要がある。

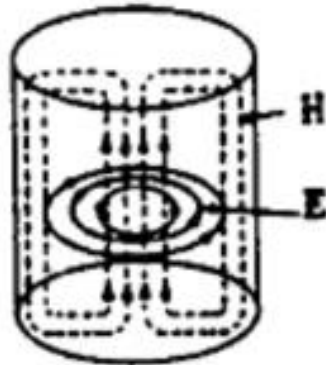
FIG. 1. Schematic of the multicavity proton cyclotron accelerator.

# TE-Modes in Cylindrical Resonator

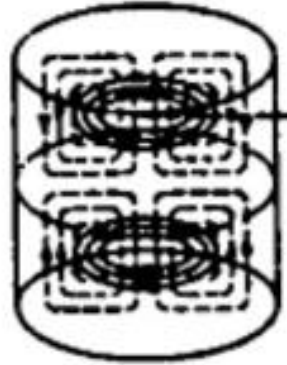
XとYで位相を90° ずらして重ね合わせて回転電場を作る。



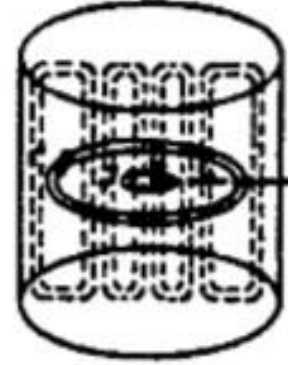
TE<sub>111</sub> mode



TE<sub>011</sub> mode



TE<sub>012</sub> mode



TE<sub>021</sub> mode

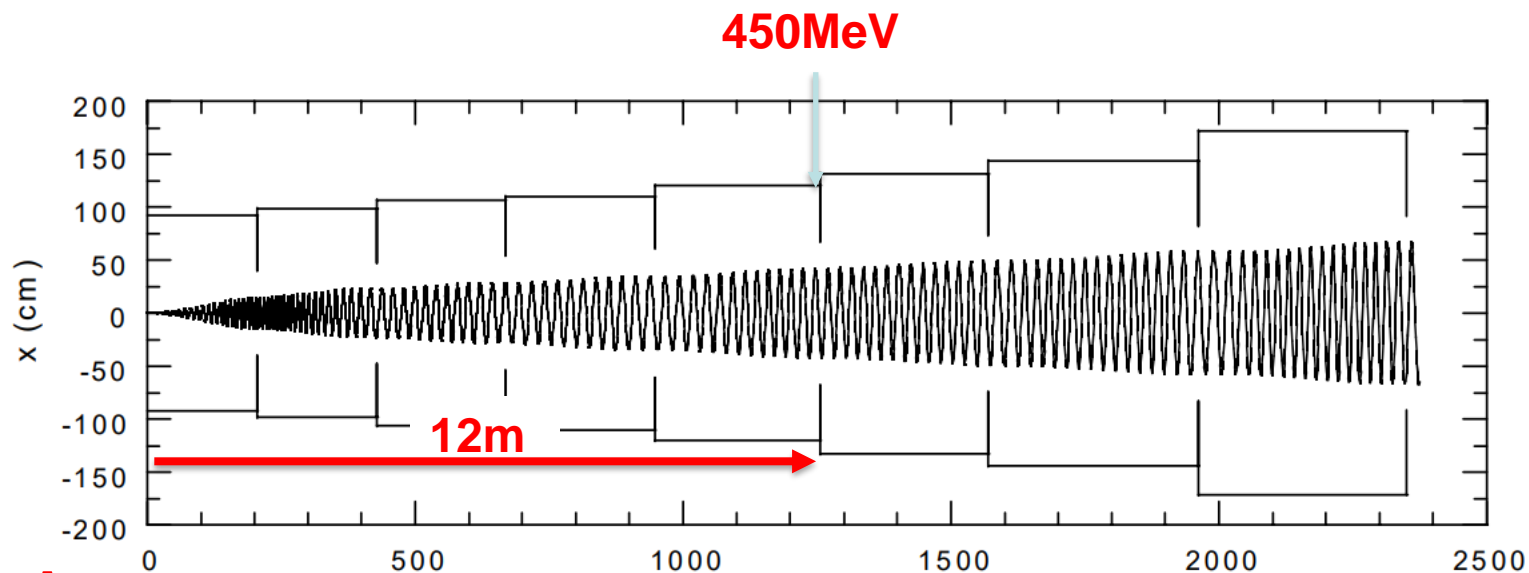


TE<sub>112</sub> mode



TE<sub>111</sub> mode

# CARA



8Tの内径: 3mφ !

TABLE I. Parameters for an eight-cavity proton accelerator with 122 mA average current.

Stage No.	Cavity frequency (MHz)	Cavity radius (cm)	Cavity length (m)	rf power input (MW)	Beam-loaded cavity $Q_L$	Intrinsic cavity $Q_o$ (copper)	Peak surface field (MV/m)	Mean final energy gain (MeV)
1	120	92	2.06	18.0	$6.25 \times 10^4$	$1.1 \times 10^5$	7.2	63.6
2	112	98	2.23	15.0	$3.23 \times 10^4$	$1.1 \times 10^5$	4.4	86.8
3	104	106	2.39	15.5	$4.72 \times 10^4$	$1.2 \times 10^5$	5.0	76.9
4	96	110	2.81	18.5	$4.50 \times 10^4$	$1.2 \times 10^5$	4.9	94.7
5	88	120	3.07	24.0	$4.13 \times 10^4$	$1.2 \times 10^5$	4.9	128.7
6	80	132	3.38	23.0	$3.35 \times 10^4$	$1.3 \times 10^5$	4.0	139.9
7	72	144	3.92	30.0	$3.55 \times 10^4$	$1.3 \times 10^5$	4.2	178.4
8	64	172	3.89	30.0	$3.34 \times 10^4$	$1.5 \times 10^5$	3.6	190.7
Total			23.75	174.0				959.7

阪大の神田さんのグループが低エネルギー側の加速をR&D中

# MERITによるミュオン生成(京大森グループ)



図2 中性子生成 ERIT 方式リング

Proton energy (11MeV)

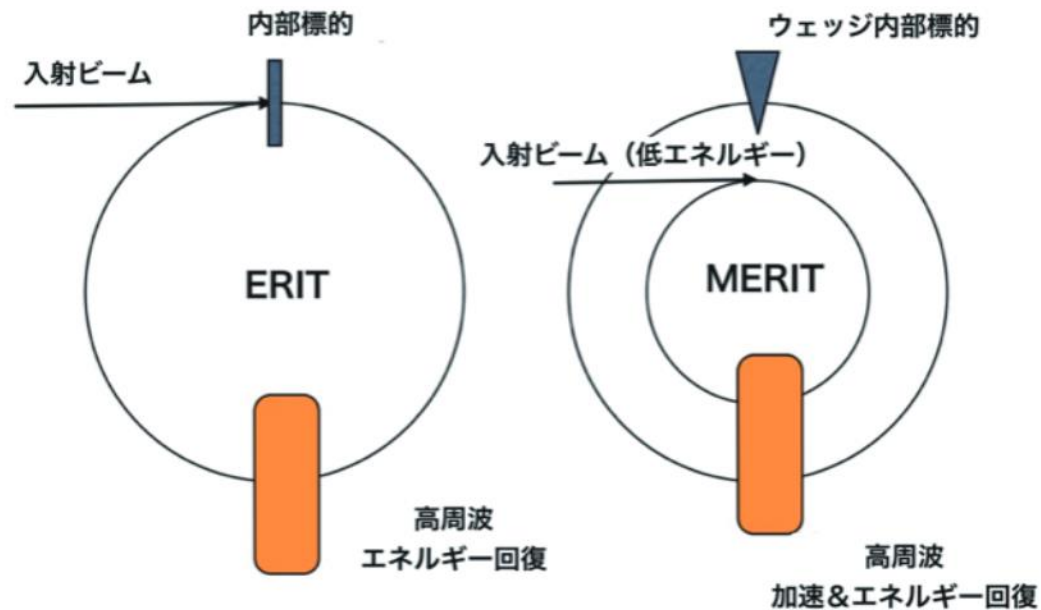


図3 ERIT並びにMERIT方式の比較

ERIT→MERIT(ミュオン発生可能)

パイオンの捕獲効率はこのくらいか？

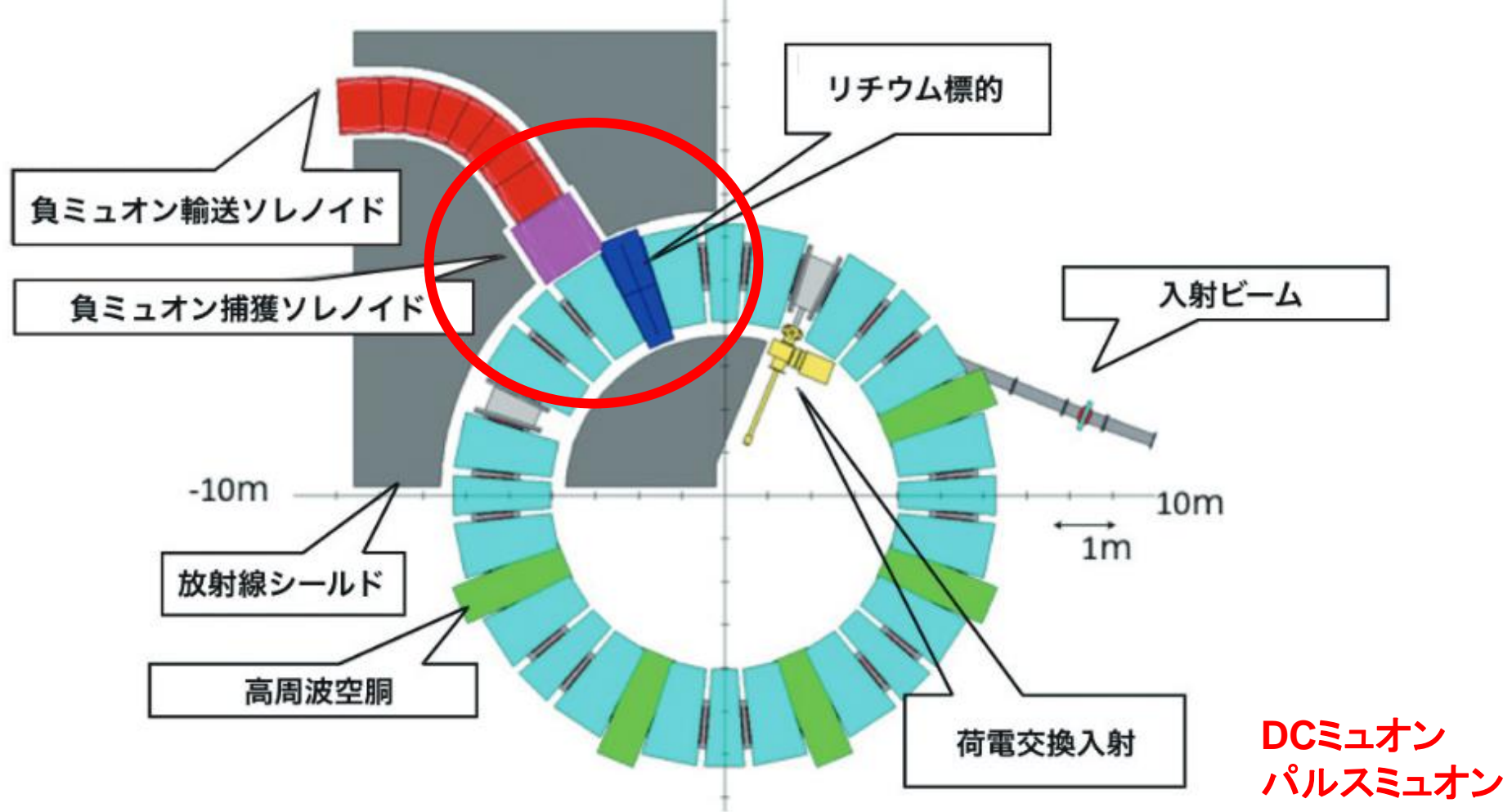


図4 MERIT リングの基本構成

# 今後の展望

- 「400MeV, proton, 1 $\mu$ A, パルス」を実現する。
- 超伝導サイクロトロン (SC230) +Mini ASTOR (RIKEN, SHI, TRIUMF (TRISTOR))
- ASTORized 超伝導サイクロトロン (RIKEN, SHI, TRIUMF)
- CARA (理研、阪大)
- MERIT (理研、京大)