

K900超伝導AVFサイクロトロン の設計研究

大阪大学 核物理研究センター
福田光宏

共同研究者

日本原子力研究開発機構 高崎量子応用研究所

荒川和夫、奥村進、石井保行、斎藤勇一、宮脇信正、
水橋清、上松敬、倉島俊、千葉敦也、酒井卓郎、
奈良孝幸、横田涉、神谷富裕

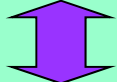
住友重機械

立川敏樹、宮崎洋文、松原雄二、密本俊典

超伝導AVFサイクロトロン仕様

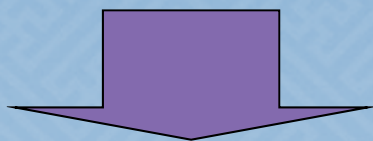
要求

加速イオン種

陽子

 鉛イオン

最大加速エネルギー

- ・Proton 300 MeV
- ・炭素 100 MeV/核子 以上
- ・クリプトン 120 MeV/核子 以上

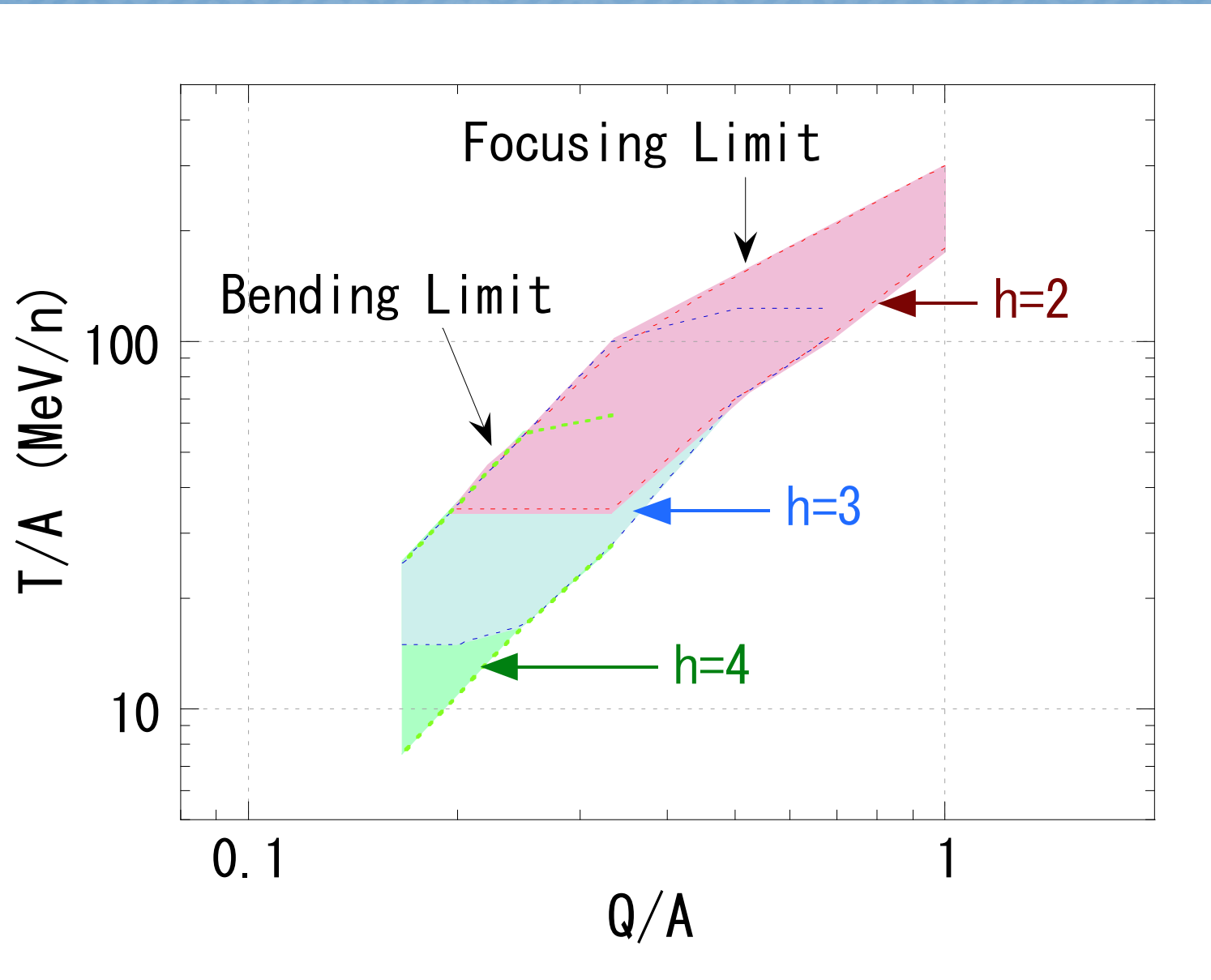


K900超伝導AVFサイクロトロン

Ion	M	Q	M/Q	E/M (MeV)	E (GeV)
H	1	1	1.00	300	0.3
C	12	4	3.00	100	1.2
	12	5	2.40	125	1.5
	12	6	2.00	150	1.8
Kr	84	28	3.00	100	8.4
	84	34	2.47	121	10.2
	86	36	2.39	126	10.8

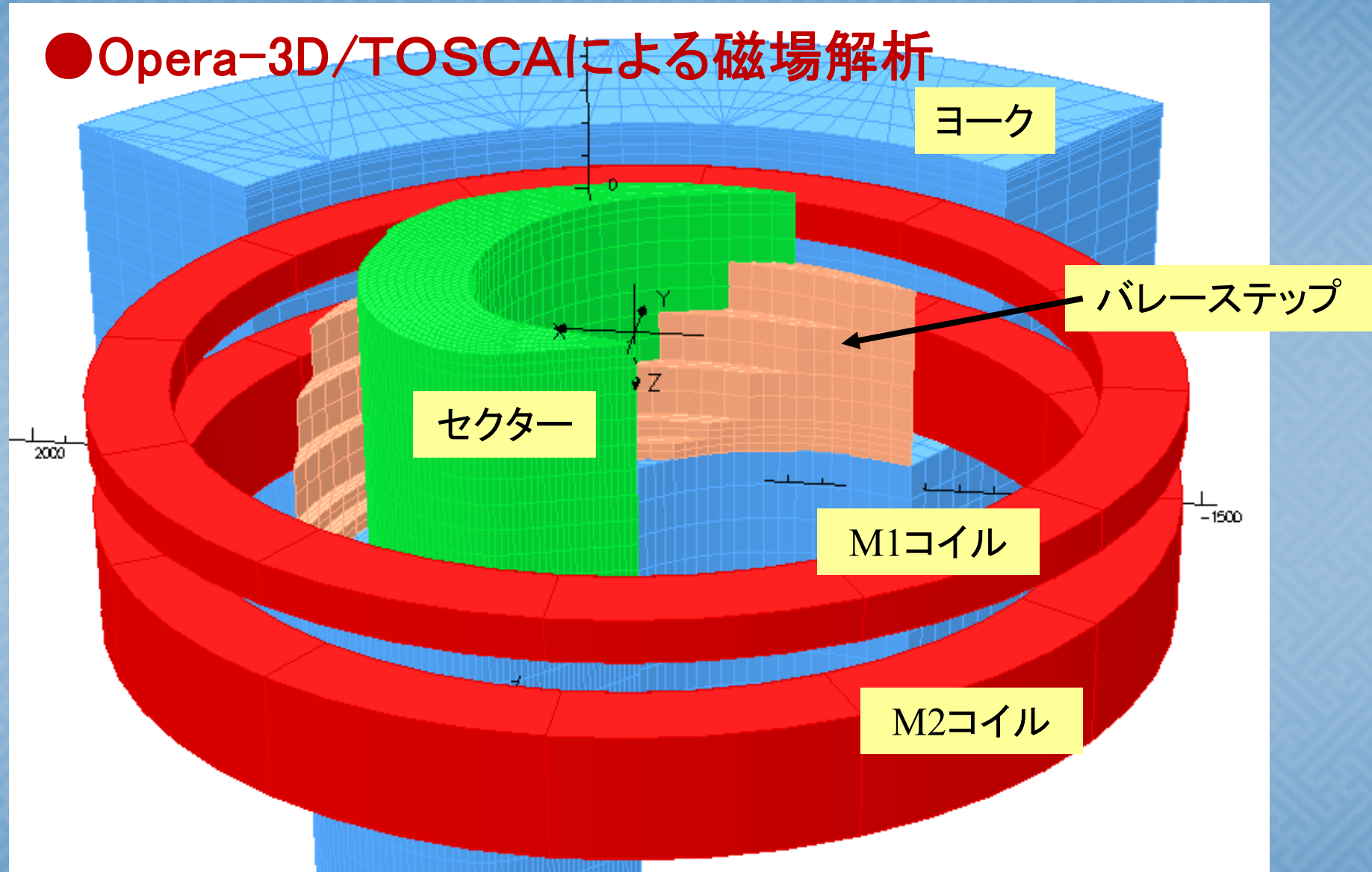
- ★省スペース → 省建設コスト
- ★省電力 → 省運転コスト
- ★加速イオン種・エネルギー範囲が幅広い
- ★ビーム強度が大きい
- ★イオン種・エネルギーの切替が早い

加速エネルギー一範圍



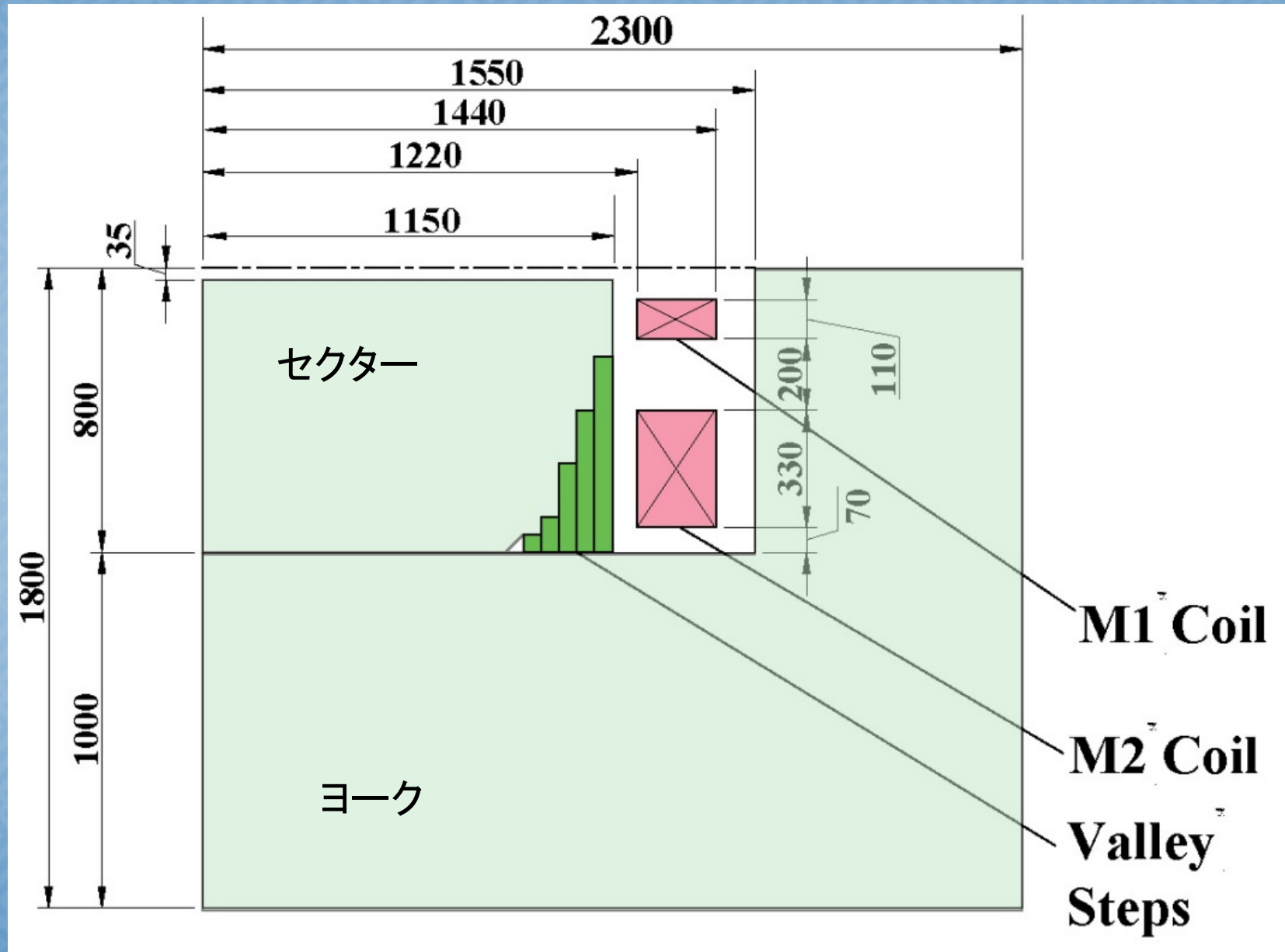
主電磁石の磁場計算モデル

● Opera-3D/TOSCAによる磁場解析



・対称性(4セクター、上下対称)を仮定し、電磁石の1/8の部分进行計算

磁極 & ヨーク & 主コイル等のサイズ



K900超伝導AVFサイクロトロンの主なパラメータ

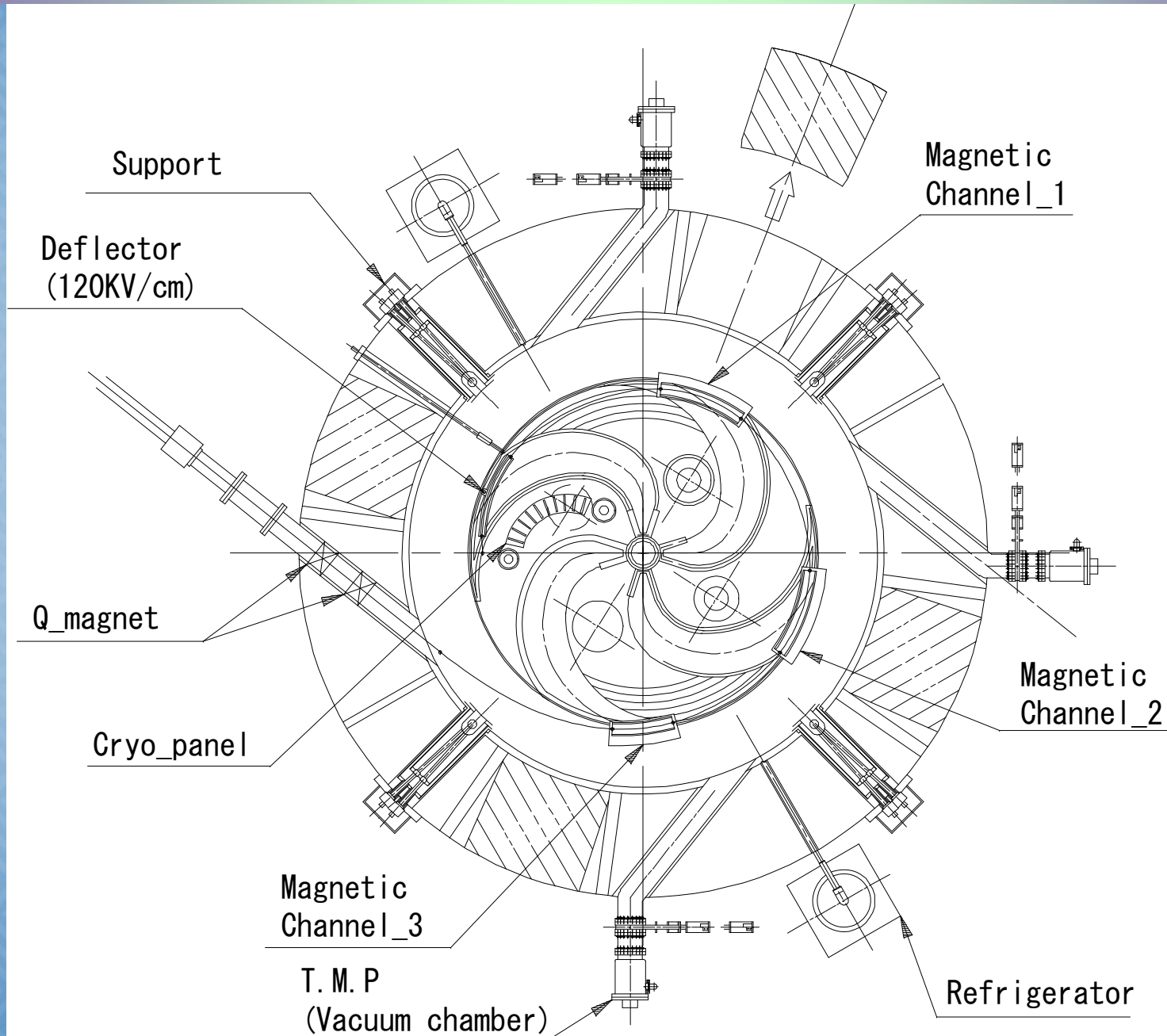
偏向リミット K_b	900
集束リミット K_f	300
ポール径	2300 mm
セクター数	4
セクターギャップ	70 mm
最大平均磁場	4.5 T
引出半径	1050 mm
ディー電極数	4 in valleys
RF 周波数	24 to 64 MHz
加速ハーモニクス	2, 3, 4
最大ディー電圧	100 kV

3セクターは π モード・ストップバンド
($\nu_r = N/2$ 共鳴, N はセクター数)が問題。
(\because 300 MeV 陽子は $\nu_r \doteq \gamma = 1.32$)

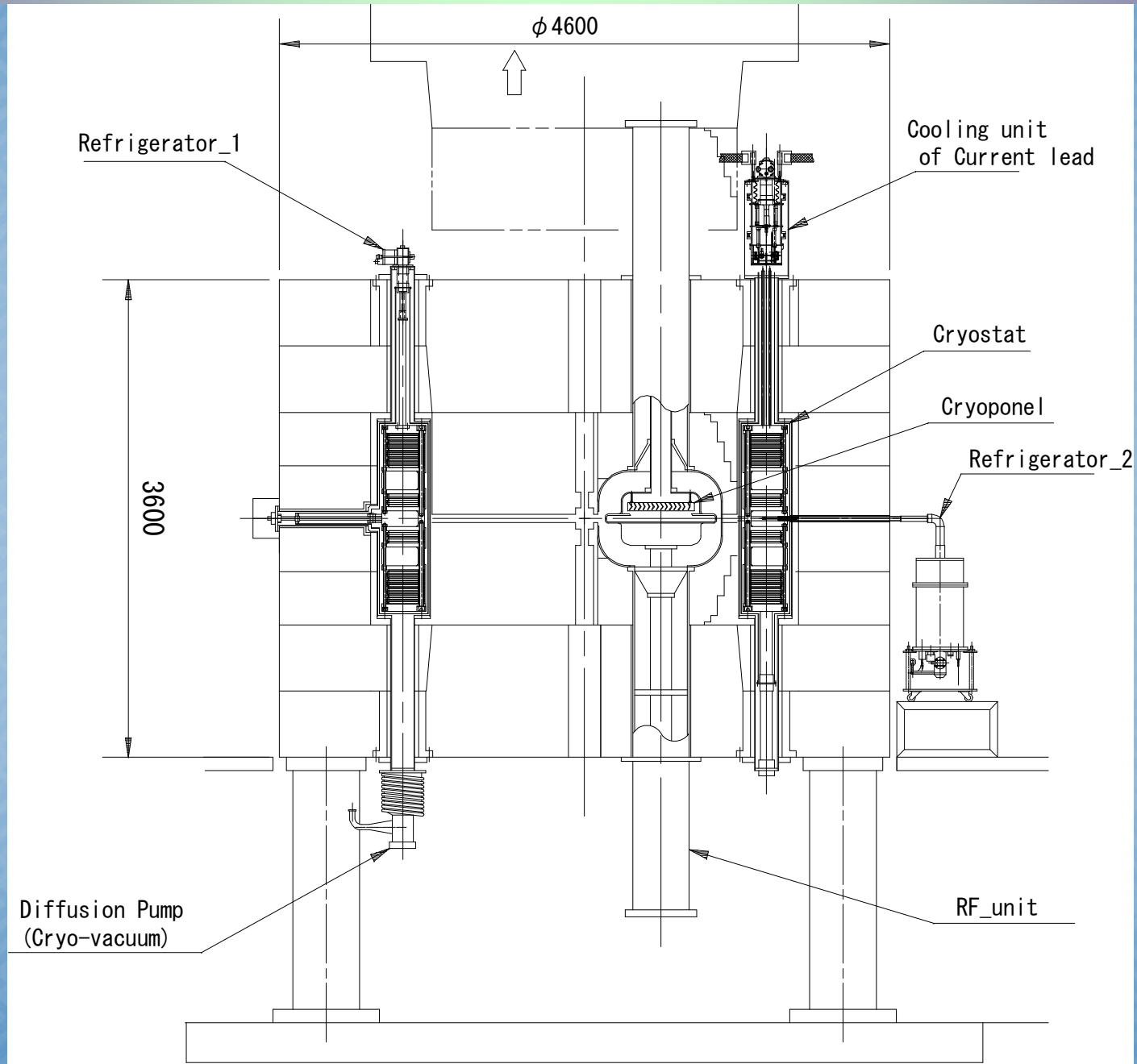
引出機器、ビーム診断機器などの
設置スペースの確保が重要

4セクター・4ディーの場合、
エネルギー利得の点で有利

K900超伝導AVFサイクロトロン of 構想図 (平面図)



K900超伝導AVFサイクロトロンのご構想図(断面図)



軽イオン加速と重イオン加速を両立させるための工夫

(1) 幅広い加速イオン種・エネルギー範囲をカバー

- ・多様な等時性磁場の生成

(2) 陽子の高エネルギー化

- ・縦方向の集束力の確保

(3) 重イオンの高エネルギー化

- ・重イオンの多価化

(4) エネルギー下限値を現マシンとオーバーラップ

- ・共鳴現象の回避

平均磁場とベータトロン振動数 : 300MeV Proton

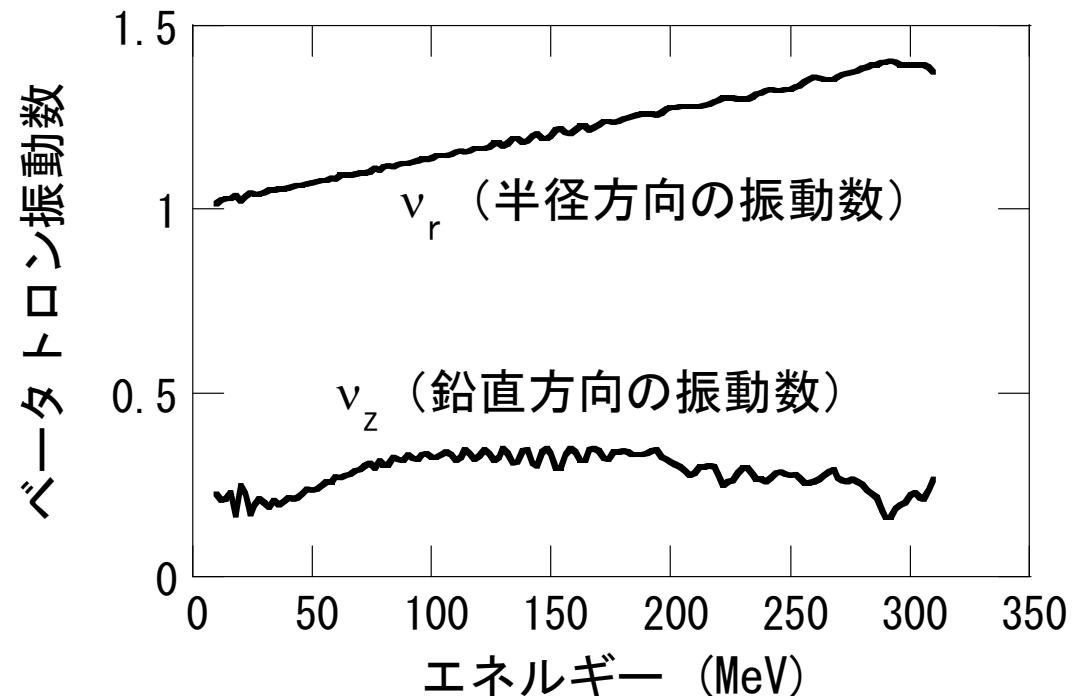
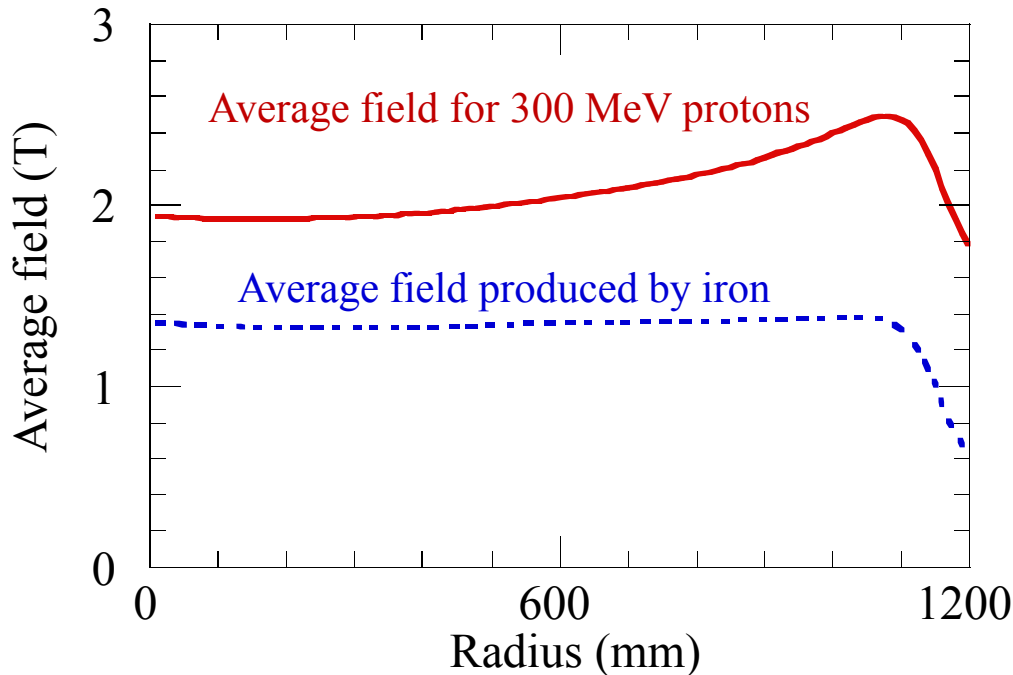
Protonの高エネルギー化



ビーム集束力の確保

★磁極形状の最適化

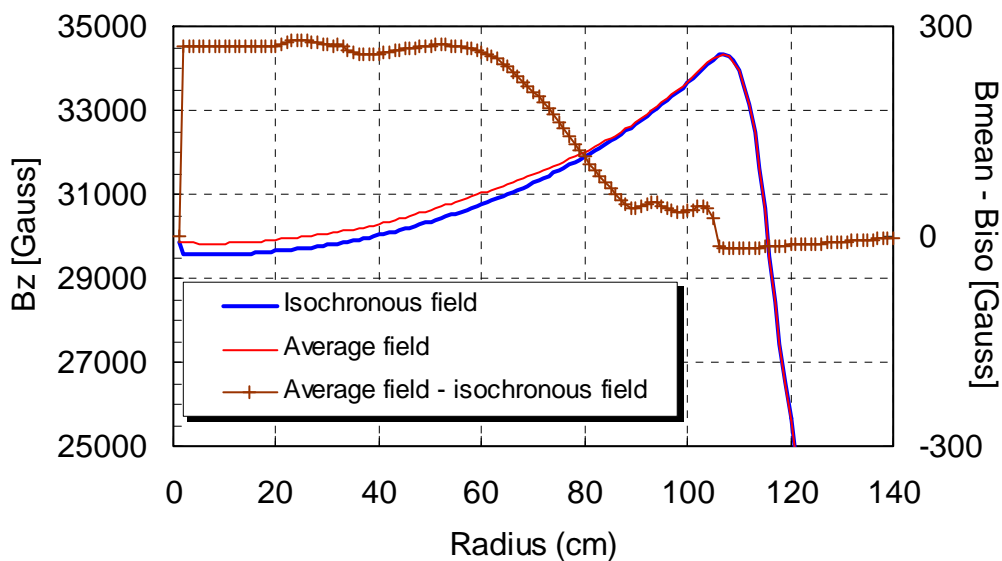
- ・スパイラル角 ε (スパイラル係数)
- ・セクターのスパン角
- ・バレーステップ など



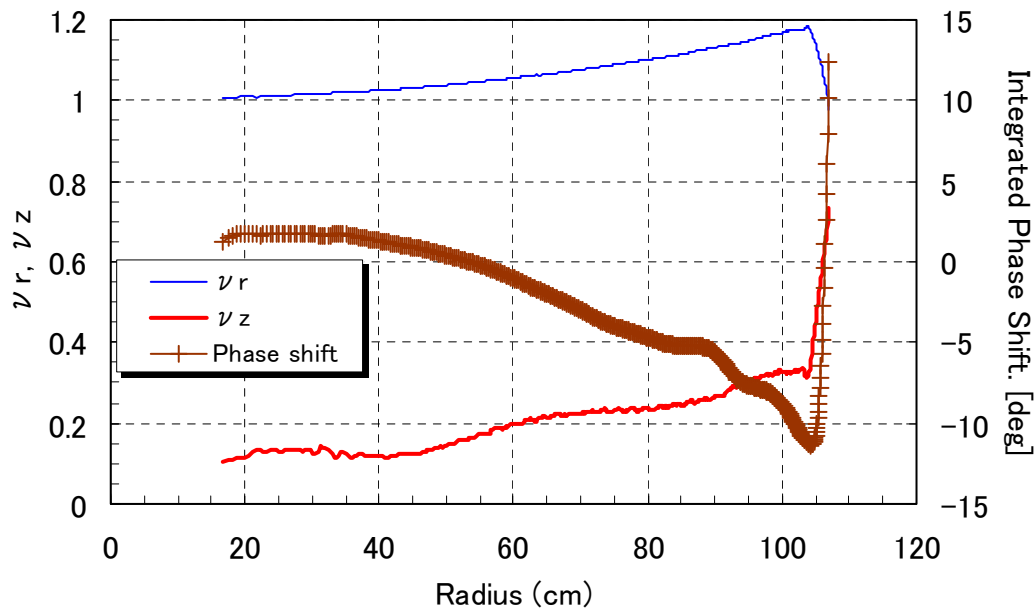
平均磁場とベータトロン振動数 : $150 \text{ MeV/n } ^{20}\text{Ne}^{10+}$

Focusing limitでの加速

Average Field



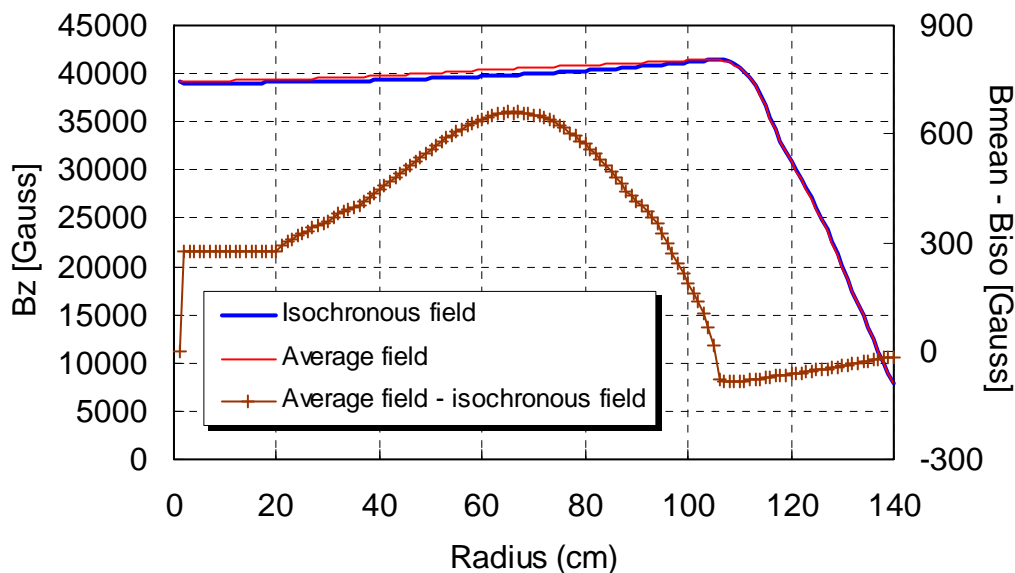
ν_r, ν_z and Phase Shift



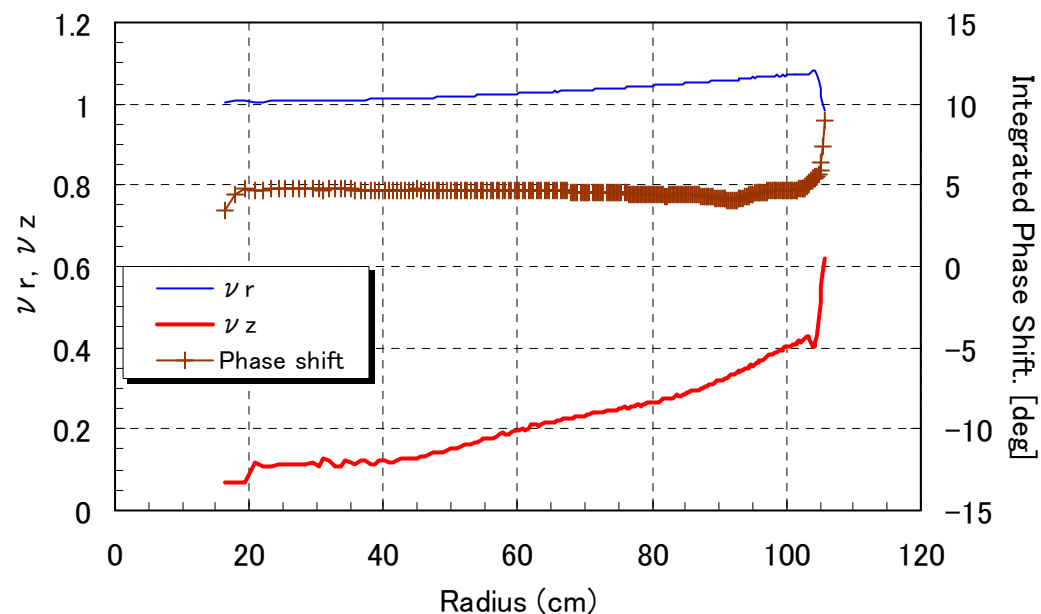
平均磁場とベータatron振動数 : 56 MeV/n $^{40}\text{Ar}^{10+}$

Bending limitでの加速

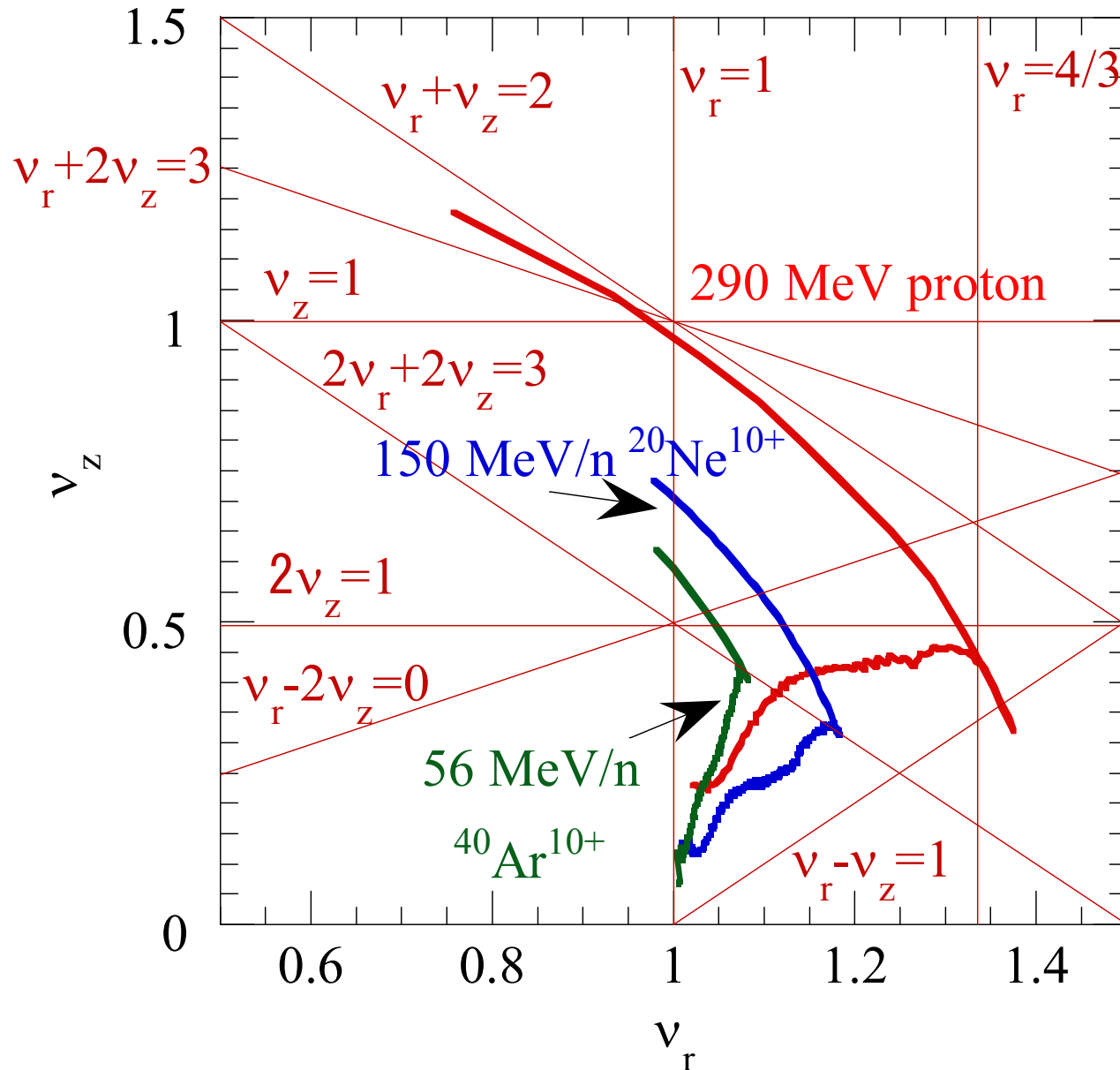
Average Field for 56 MeV/n $^{40}\text{Ar}^{10+}$



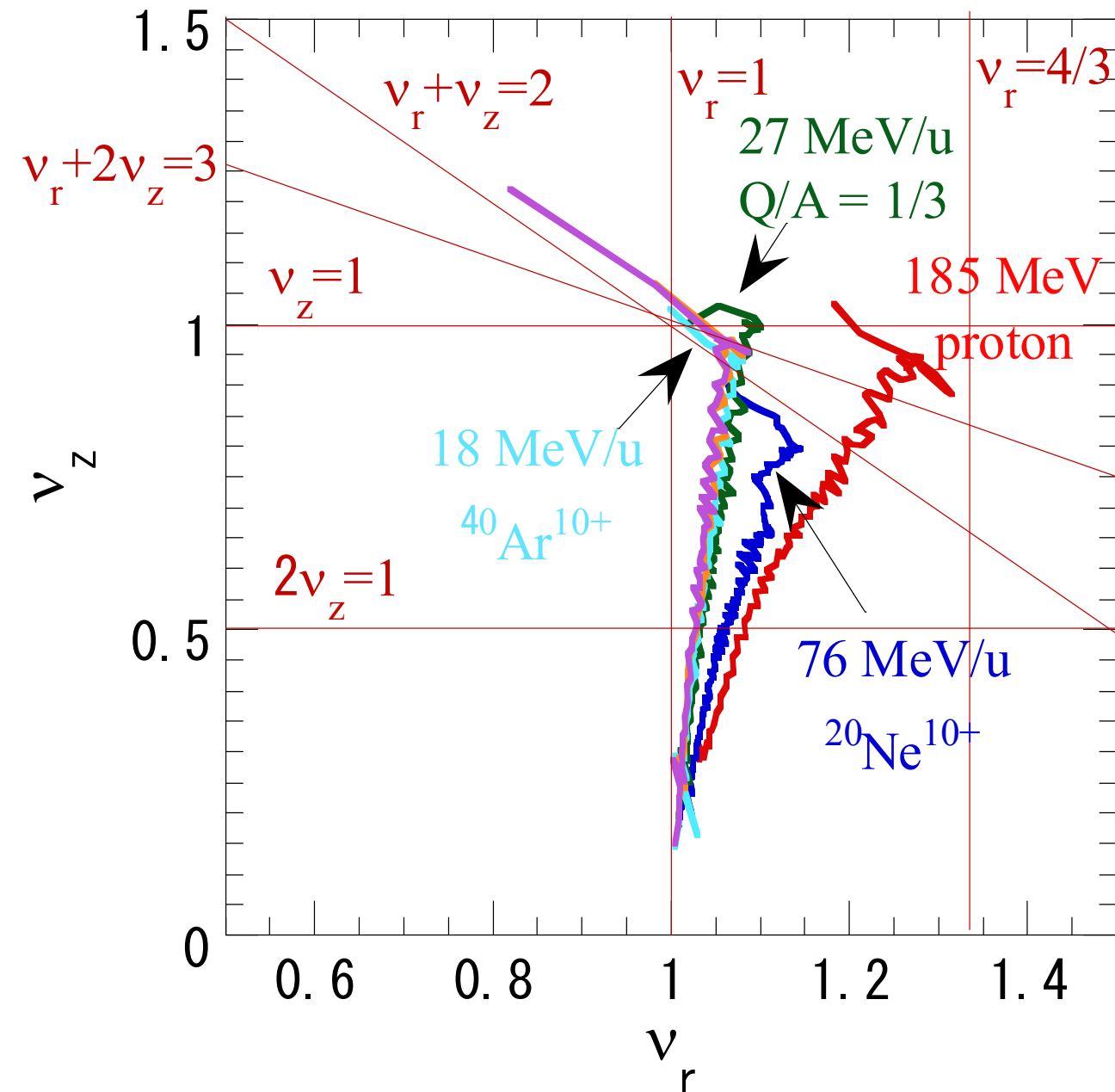
ν_r , ν_z and Phase Shift



ビーム軌道の安定性(最大エネルギー)

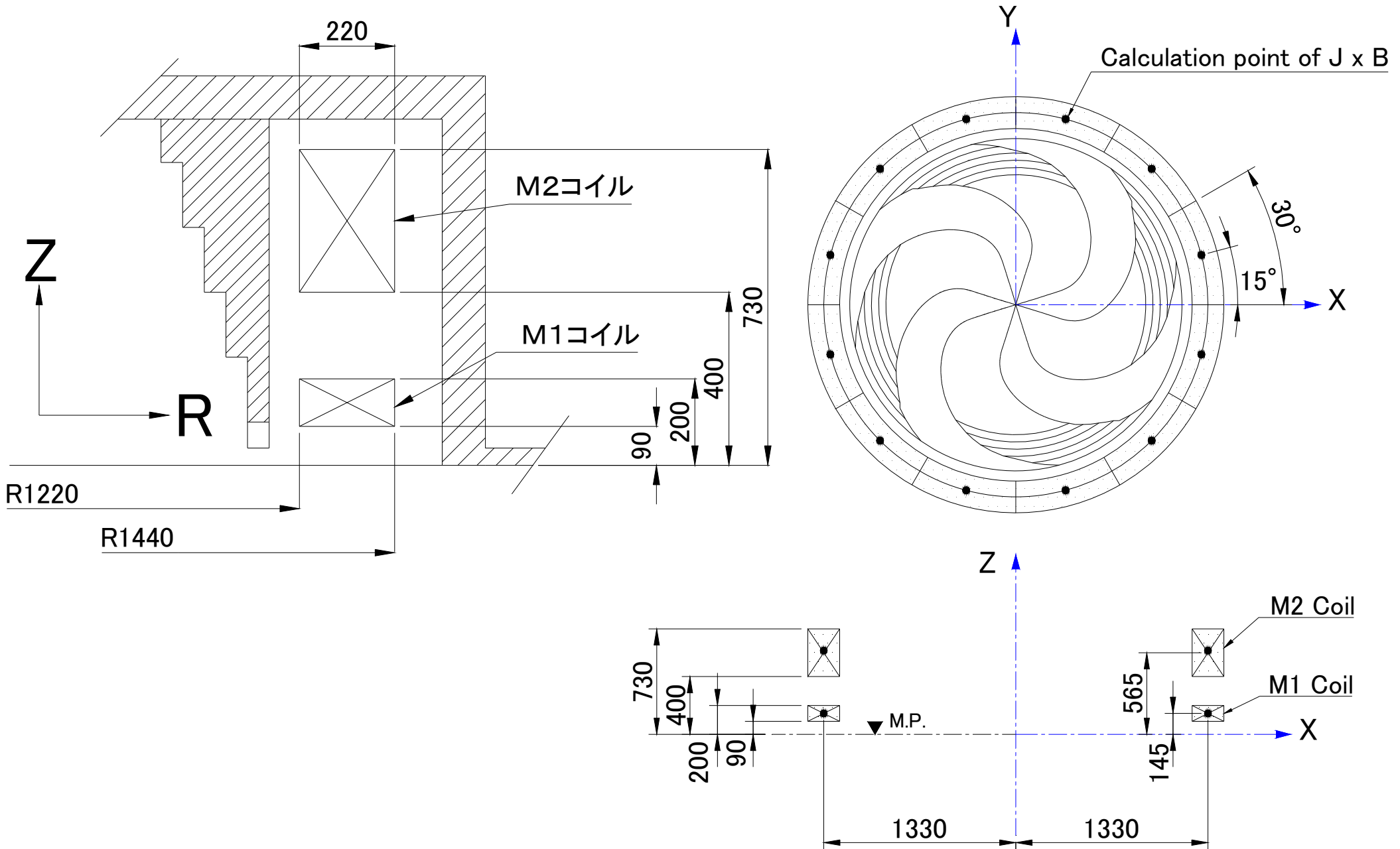


ビーム軌道の安定性(最小エネルギー)



M/Q	イオン種	下限値 (MeV/n)
1	Proton	185
2	$^{20}\text{Ne}^{10+}$	76
3	—	27
4	$^{40}\text{Ar}^{10+}$	18
5	$^{40}\text{Ar}^{8+}$	11
6	$^{84}\text{Kr}^{14+}$	8

主コイルの蓄積エネルギーとローレンツカ(I)

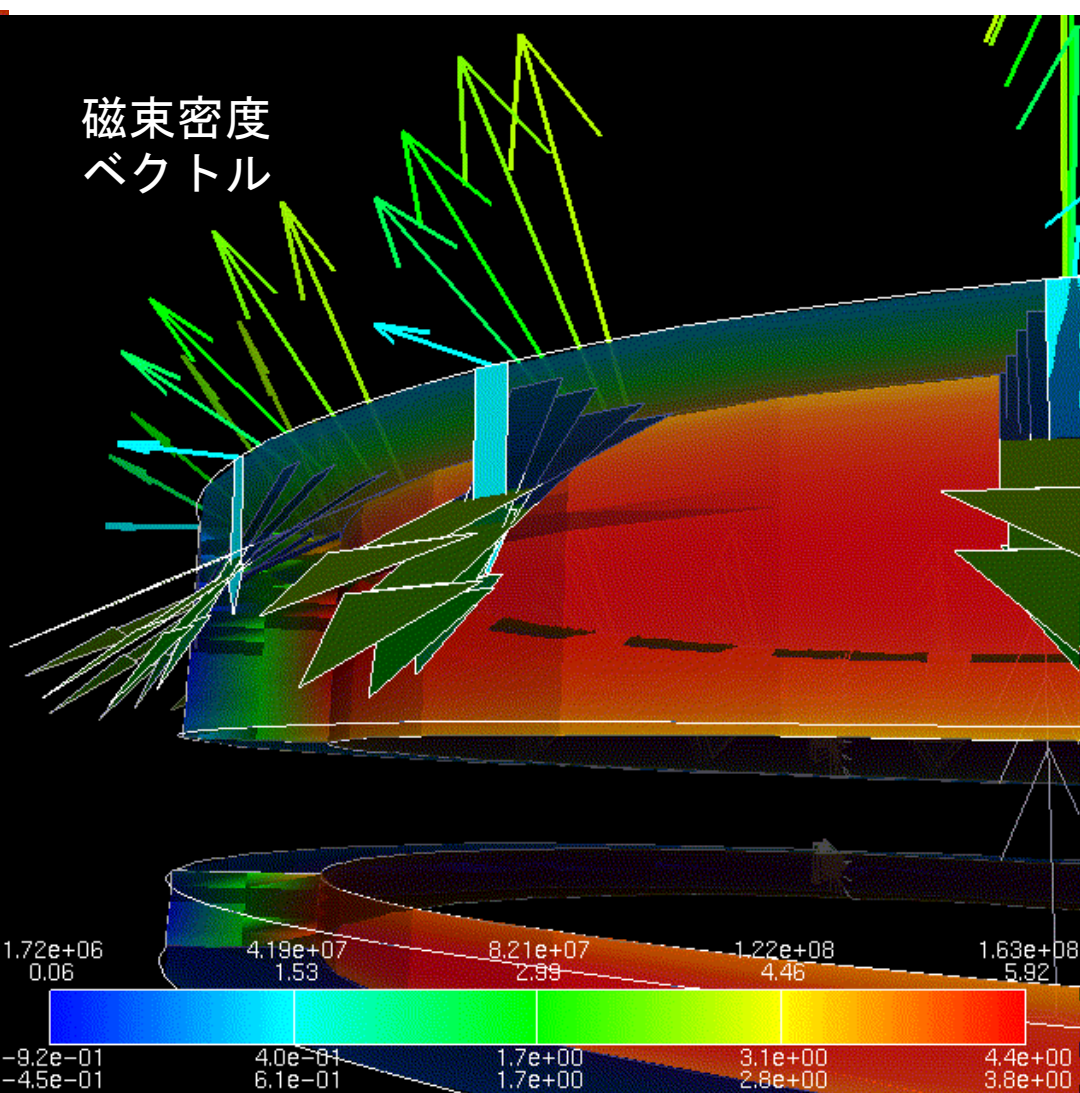
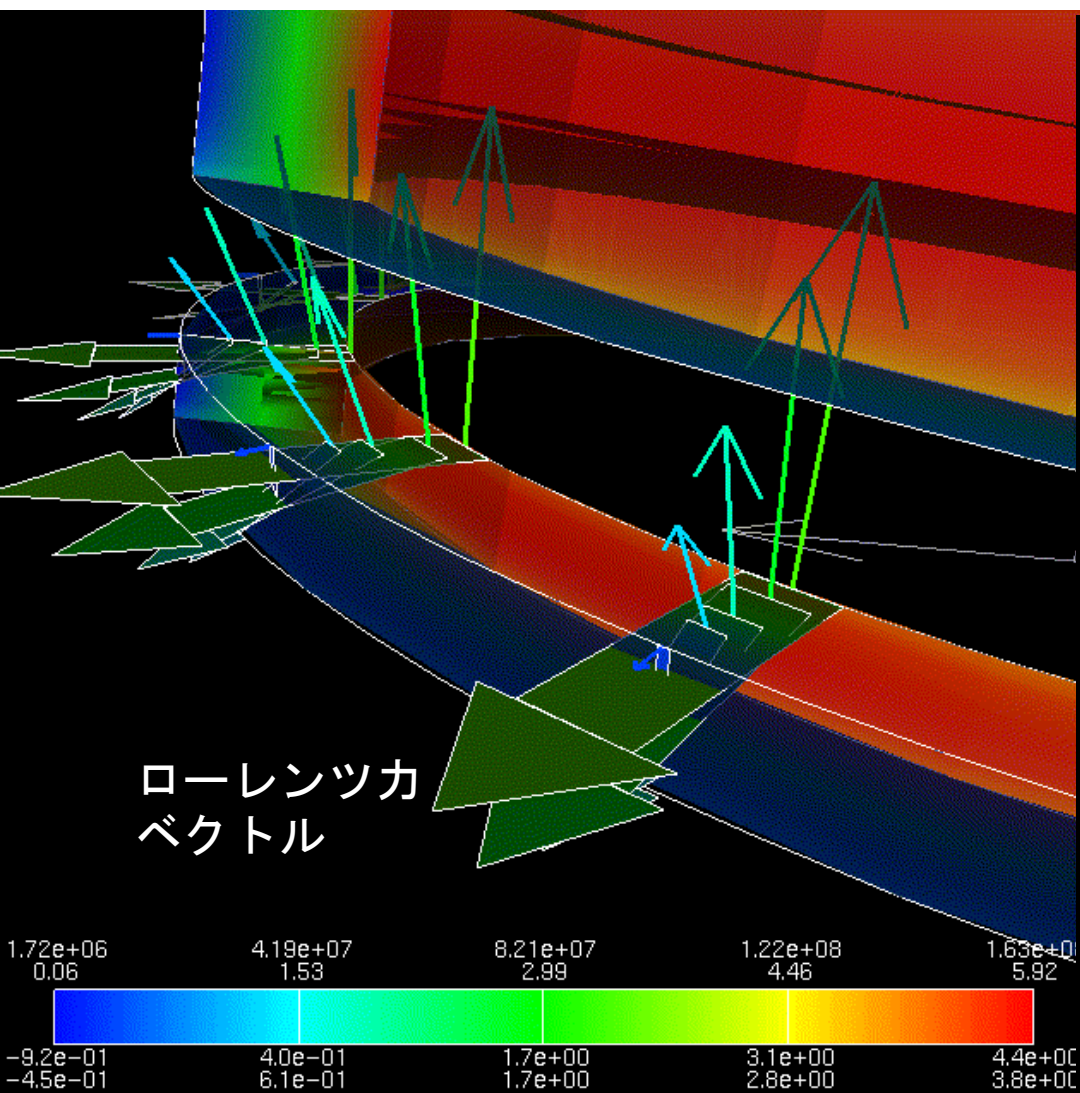


主コイルの蓄積エネルギーとローレンツ力(Ⅱ)

● 56 MeV/n $^{40}\text{Ar}^{10+}$

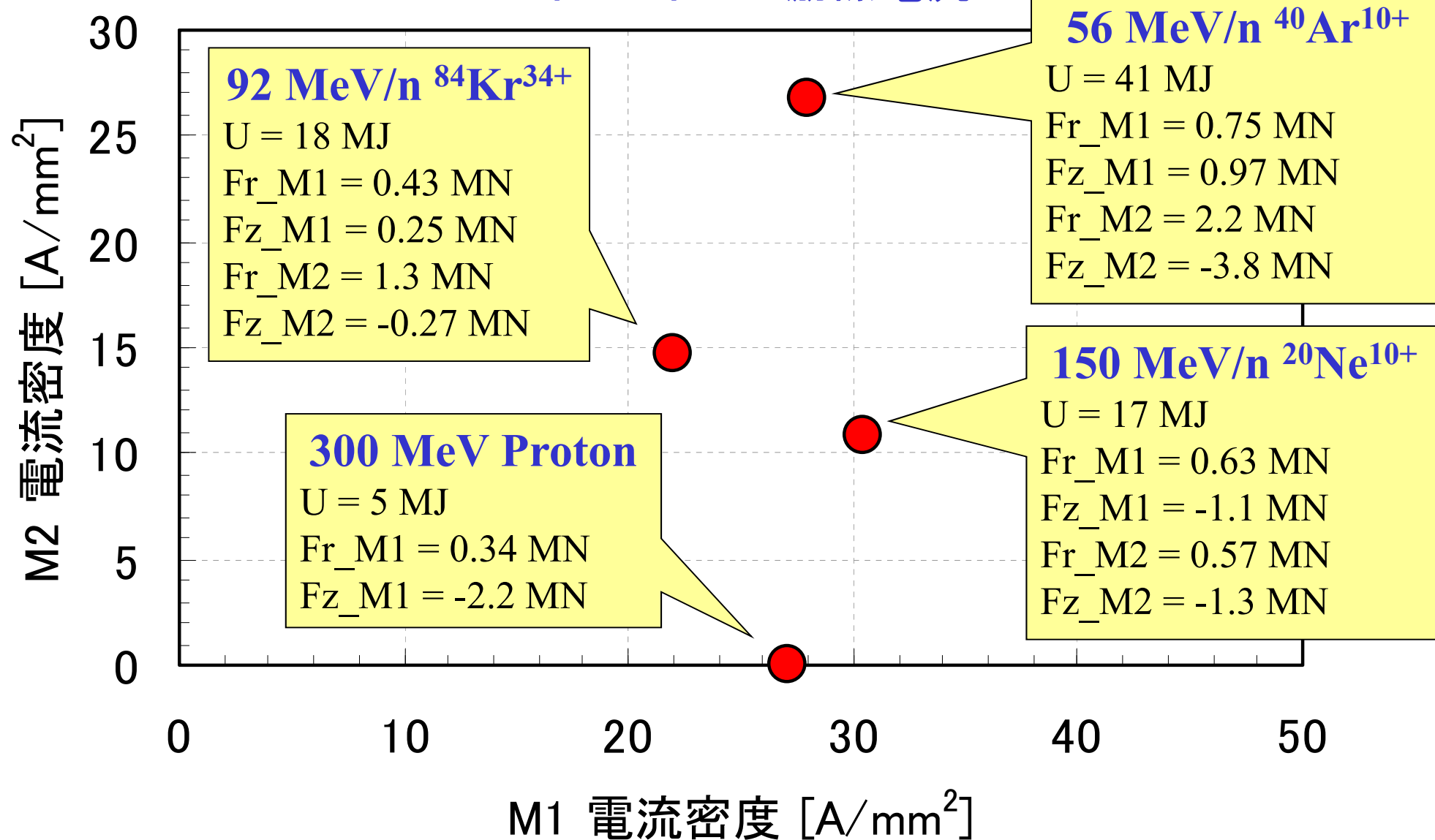
M1コイル上面に働くローレンツ力

M2コイル上面に働くローレンツ力



主コイルの蓄積エネルギーとローレンツ力(Ⅲ)

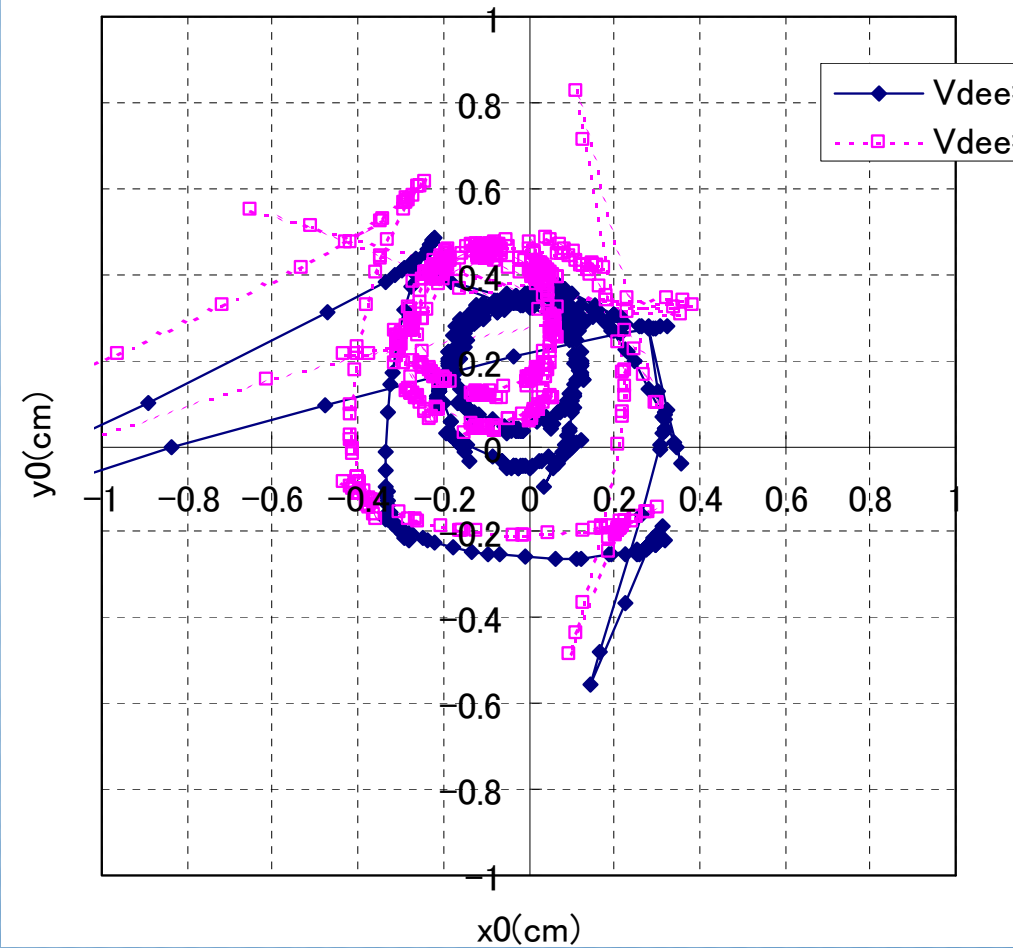
メインコイルの励磁電流



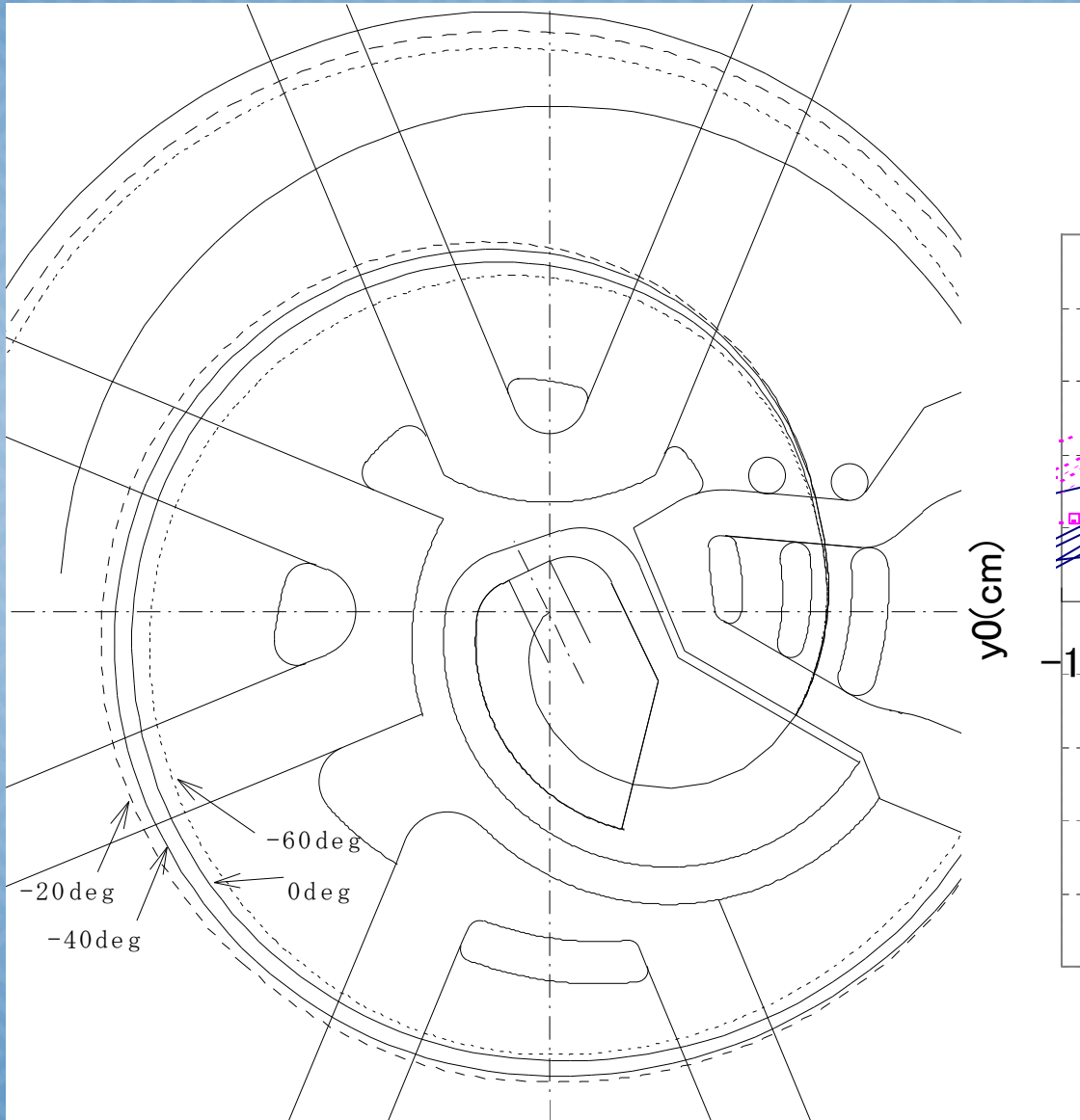
中心領域のビーム軌道 ($h=2$)

軌道中心の位置

$M/Z=1$, $B=2.0T$, $H=2$, $V_{dee}=70kV$, $V_{inj}=32.6kV$, $\text{forb}=30.49MHz$, $\phi_0=20deg$

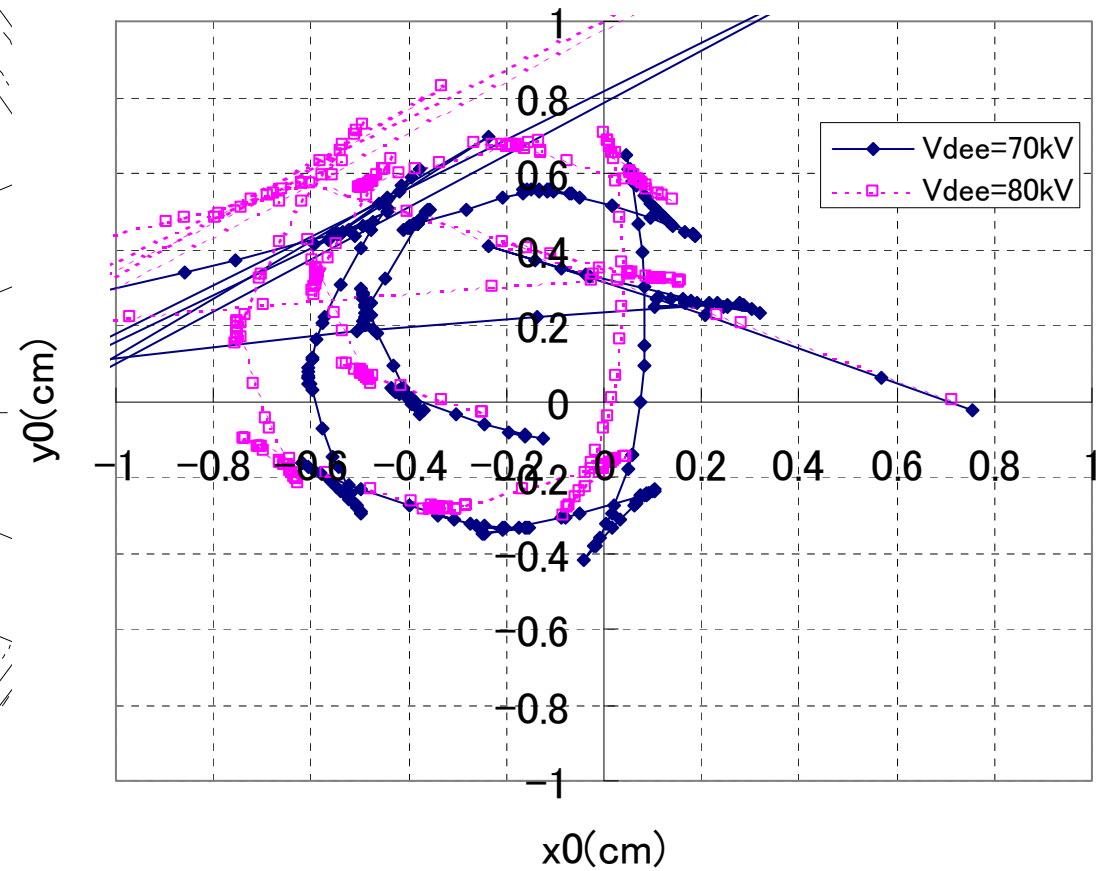


中心領域のビーム軌道 ($h=4$)



軌道中心の位置

$M/Z=3$, $B=2.75\text{T}$, $H=4$, $V_{inj}=31.12\text{kV}$, $forb=14.08\text{MHz}$



引き出し領域におけるビーム軌道

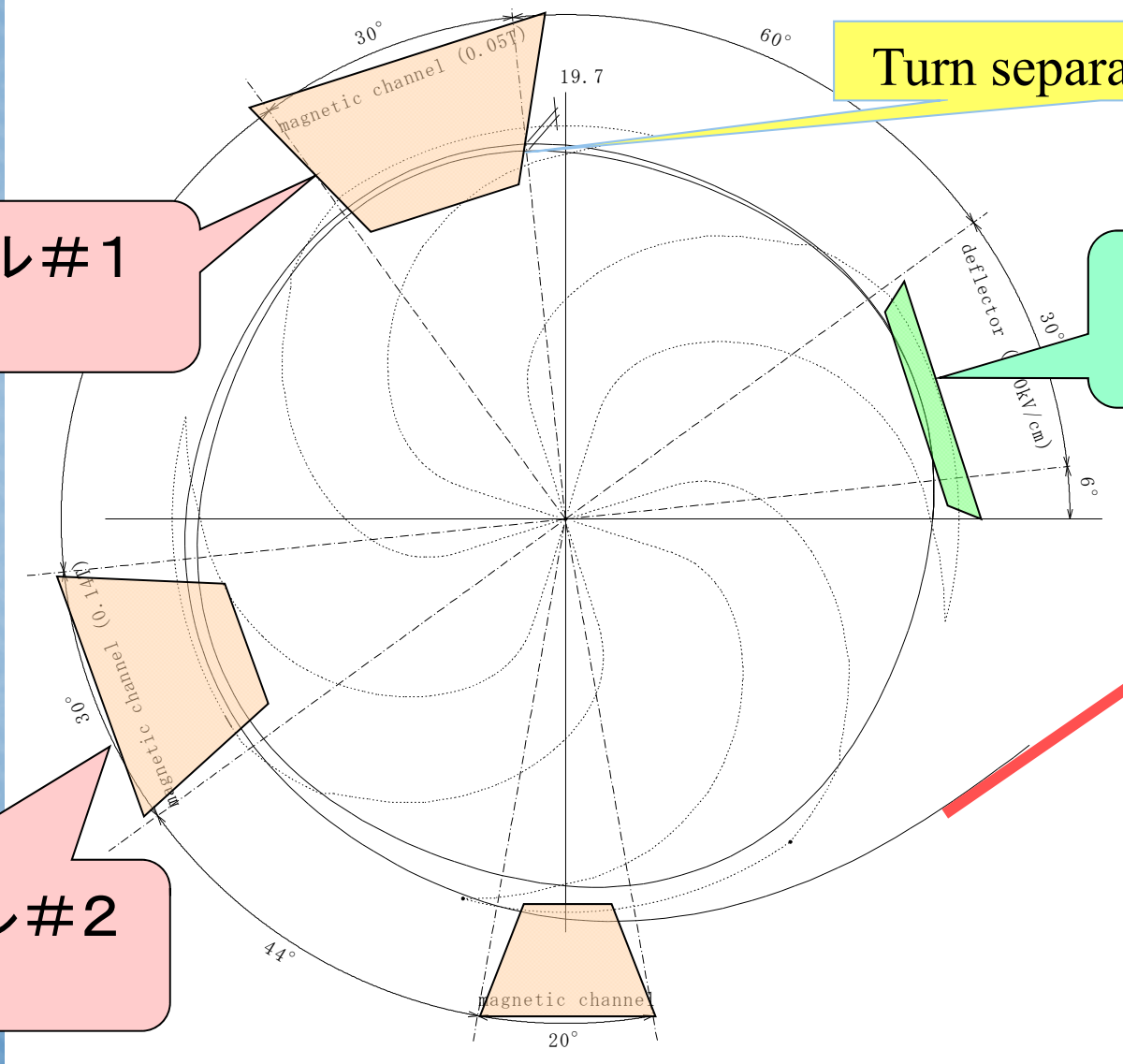
290 MeV Proton

Turn separation : 20 mm

磁気チャンネル#1
0.05 T

デフレクター
120 kV/cm

磁気チャンネル#2
0.14 T



粒子線治療用加速器の現状

e.g:

Boston

Florida

Seoul

Wanjie

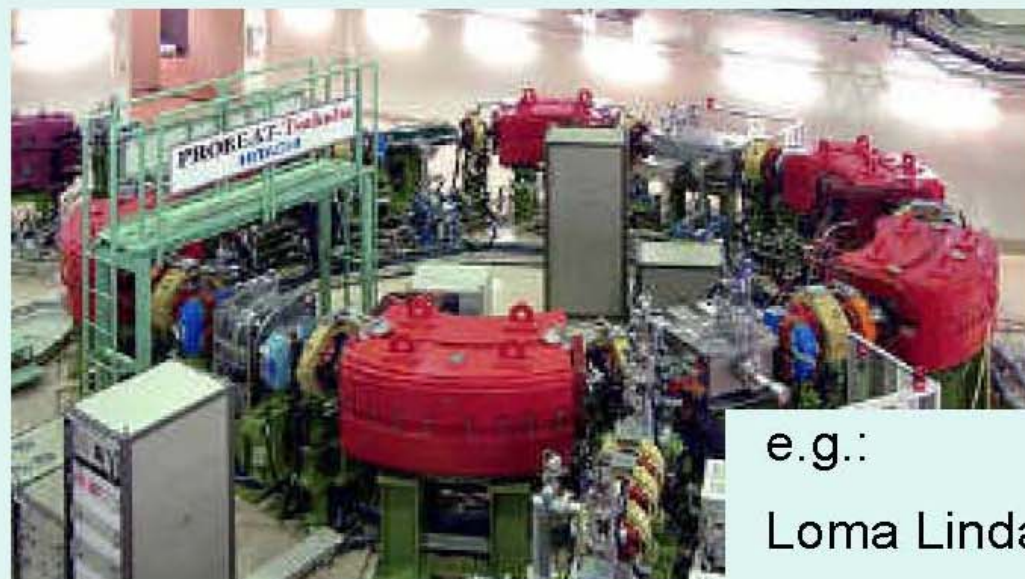
PSI

München

Orsay



3.5 m



e.g.:

Loma Linda

Houston

Tsukuba

cyclotron

synchrotron

Protons

in use, \varnothing 3.5-5 m

in use, \varnothing 8-10 m

Carbon ions

in design, \varnothing 6 m

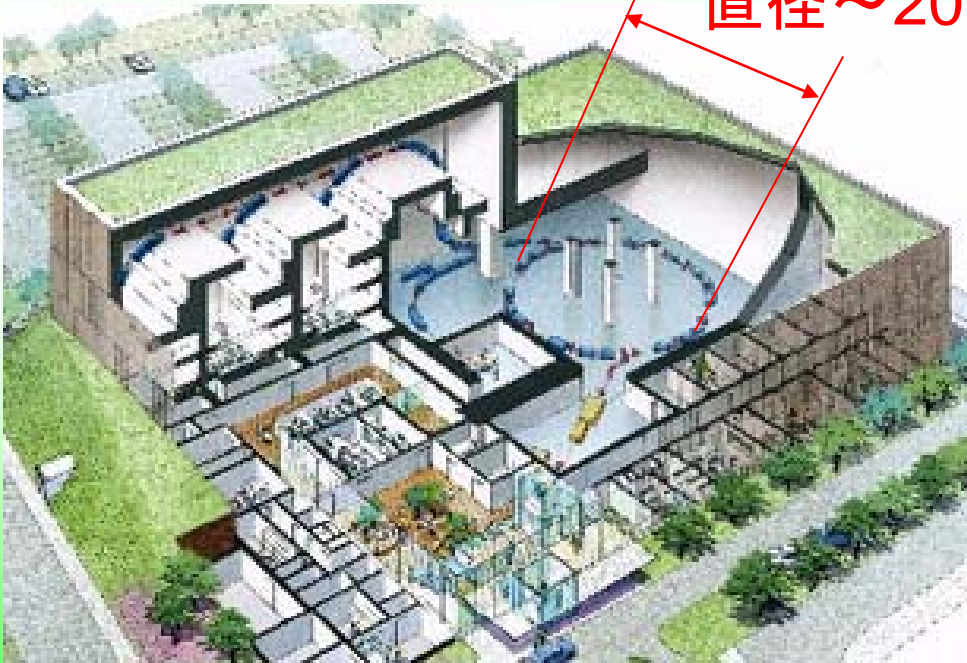
in use, \varnothing 25 m

放医研、兵庫県立粒子線治療センター、
(ハイデルベルグ大学、群馬大学など)

粒子線治療用サイクロトロンの高エネルギー化&コンパクト化

(従来)陽子 $\sim 230\text{MeV}$
→ (目標)炭素 $\sim 400\text{MeV/u}$

シンクロトロン
直径 $\sim 20\text{m}$

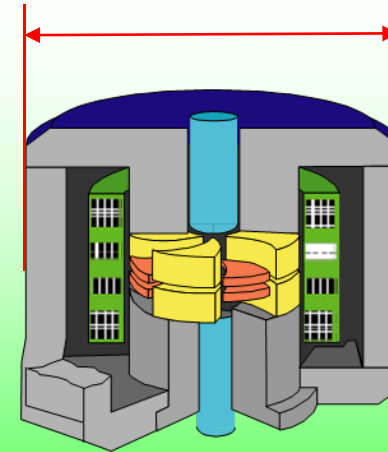


群馬大学重粒子線照射施設
炭素イオン $140 \sim 400 \text{ MeV/u}$

【解決策】

- ・高温超伝導磁場技術
本体電磁石
ECRイオン源

超電導AVFサイクロトロン
直径 $\sim 7\text{m}$!!



陽子 $\sim 260 \text{ MeV}$
炭素イオン $\sim 400 \text{ MeV/u}$