

JAERI-Tech

98-040



中性子科学研究用超伝導陽子加速器の
概念設計検討一(1)

1998年9月

本田陽一郎*・長谷川和男・大内伸夫・草野譲一・壁谷善三郎*・水本元治

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

中性子科学研究用超伝導陽子加速器の概念設計検討-(1)

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター
本田陽一郎*・長谷川和男・大内 伸夫・草野 譲一
壁谷善三郎*・水本 元治

(1998年8月20日受理)

原研では、中性子を中心とした基礎研究の推進と消滅処理の工学的研究を目的として中性子科学研究計画を提案している。この計画の中核となるのは、加速エネルギー1.5 GeV、平均出力8 MW（平均加速電流5.33 mA）のパルス・ビーム及びCWビームを出力する大強度陽子加速器である。本加速器の最大の特徴は、高エネルギー加速部（高 β リニアック部：100 MeV～1.5 GeV）にCWモードの運転に有利な超伝導加速器を選択することにある。

本報告書は、超伝導加速器に関する概念設計検討についてまとめたものである。超伝導加速器は8つの β セクションからなる設計とした。各セクションには個別の5セル・キャビティを配置し、最大表面電場を16 MV/mとした。キャビティの総数は284個、加速器長は690 mとなった。エミッタンス・グロースを抑制するために、ラティス設計にはEquipartitioned条件及びMatched envelope equationを採用した。ビーム・シミュレーションの結果、rms エミッタンス・グロースは横、縦ともに1%程度となった。また、RF誤差や四極電磁石誤差がある場合の加速器性能について、ビーム・シミュレーションを行い評価した。

A Conceptual Design Study of Superconducting
Proton Linac for Neutron Science Project –(1)

Yoichiro HONDA * , Kazuo HASEGAWA, Nobuo OUCHI, Joichi KUSANO,
Zenzaburo KABEYA * and Motoharu MIZUMOTO

Center for Neutron Science
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 20 ,1998)

The Neutron Science Project at Japan Atomic Energy Research Institute has been proposed for the research of nuclear transmutation technology and the basic science with a spallation neutron source. The project calls for an 8MW proton linac which accelerates 5.3mA average current cw and pulsed beams up to 1.5GeV. The superconducting (SC) rf-cavity is the main option for the energy part from 100MeV to 1.5GeV because by using the SC structure, less power is consumed in cw operation than by using a normal conducting (NC) structure.

A conceptual design study of the superconducting proton linac is reported. The SC linac is composed of 8 β sections. Each section has the identical 5-cell cavities with the surface peak field of 16MV/m. The total number of cavities is 284, and the length of the SC linac is 690m. The lattice design is determined with the equipartitioned condition and the matched envelope equations for the minimum emittance growth. The transverse and longitudinal rms emittance growth in the beam simulation are both about 1%. The performance of the SC linac with the RF variations and the quadrupole magnet misalignment are also studied.

Keywords : Superconducting Proton Linac, Conceptual Design, Beam Dynamics

* Mitsubishi Heavy Industries LTD.

目 次

1. 概要	1
2. 超伝導加速器の構成検討	3
2.1 β セクション分割とキャビティ・ジオメトリカル β_g の割り当て	3
2.2 ビーム・ダイナミクス・パラメータ検討	4
2.3 ラティス構成検討	6
2.4 加速器構成検討	9
3. ビーム・ダイナミクス・シミュレーション	13
3.1 シミュレーション (無誤差)	13
3.2 シミュレーション (含誤差)	14
3.2.1 RF電場/位相誤差	14
3.2.2 四極電磁石水平/垂直設置誤差	20
3.2.3 四極電磁石ロール誤差	24
3.2.4 RF誤差及び四極電磁石誤差	27
4. まとめと今後の課題	29
謝辞	30
参考文献	30
付録A 超伝導加速器ダイナミカル・パラメータ及びラティス・パラメータ (抜粋)	49
付録B 超伝導加速器加速周波数依存性の検討	57
付録C 超伝導加速器エミッタンス、ビーム電流、Tune depression、ビーム・サイズに関する考察	61

Contents

1. Introduction.....	1
2. Study of the SC Linac Structure.....	3
2.1 β Sections and β_g of Cavities.....	3
2.2 Beam Dynamics Parameters.....	4
2.3 Lattice Structure.....	6
2.4 Linac Structure Design.....	9
3. Beam Dynamics Simulations.....	13
3.1 Simulation without any Errors.....	13
3.2 Simulations with Errors.....	14
3.2.1 RF Amplitude / Phase Errors.....	14
3.2.2 Quadrupole Magnet Horizontal / Vertical Displacements.....	20
3.2.3 Quadrupole Magnet Roll Displacements.....	24
3.2.4 RF Errors and Quadrupole Magnet Displacements.....	27
4. Conclusions and Problems.....	29
Acknowledgement.....	30
References.....	30
Appendix A. Dynamical Parameters and Lattice Parameters of the SC Linac.....	49
Appendix B. Study of the RF Frequency for the SC Linac.....	57
Appendix C. Study of the Emittance, the Beam Current, the Tune Depression, and the Beam Size of the SC Linac.....	61

図表リスト

表 1.1 超伝導加速器の基本パラメータ -----	2
表 1.2 本報告書で使用される主な記号と略語 -----	2
表 2.1 キャビティ形状パラメータ -----	5
表 2.2 スペース・チャージ力によるエミッタンス・グロースの主なメカニズム -----	7
表 2.3 加速器の基本パラメータ -----	9
表 2.4 β セクション数5の加速器の β_g 、 β セクション範囲、加速位相、キャビティ数 及び四極電磁石長 -----	10
表 2.5 β セクション数6の加速器の β_g 、 β セクション範囲、加速位相、キャビティ数 及び四極電磁石長 -----	11
表 2.6 β セクション数7の加速器の β_g 、 β セクション範囲、加速位相、キャビティ数 及び四極電磁石長 -----	11
表 2.7 β セクション数8の加速器の β_g 、 β セクション範囲、加速位相、キャビティ数 及び四極電磁石長 -----	11
表 2.8 β セクション数9の加速器の β_g 、 β セクション範囲、加速位相、キャビティ数 及び四極電磁石長 -----	11
表 2.9 β セクション数8の E_{acc} 及びラティス間隔 -----	12
表 3.1 シミュレーション結果(RF 電場誤差 $\pm 1.0\%$) -----	15
表 3.2 シミュレーション結果(RF 位相誤差 $\pm 1.0^\circ$) -----	16
表 3.3 RF 電場誤差 $\pm 1.0\%$ を与えた場合と RF 位相誤差 $\pm 1.0^\circ$ を与えた場合の比較 -----	16
表 3.4 シミュレーション結果(RF 電場/位相誤差 $\pm 1.0\%/ \pm 1.0^\circ$) -----	17
表 3.5 シミュレーション結果(RF 電場/位相誤差 $\pm 2.0\%/ \pm 2.0^\circ$) -----	18
表 3.6 シミュレーション結果(RF 電場/位相誤差 $\pm 3.0\%/ \pm 3.0^\circ$) -----	19
表 3.7 RF 電場/位相誤差 $\pm 1.0\%/ \pm 1.0^\circ$ 、 $\pm 2.0\%/ \pm 2.0^\circ$ 、 $\pm 3.0\%/ \pm 3.0^\circ$ を与えた場合の比較 -----	19
表 3.8 シミュレーション結果(四極電磁石水平/垂直設置誤差 $\pm 0.10\text{mm}$) -----	21
表 3.9 シミュレーション結果(四極電磁石水平/垂直設置誤差 $\pm 0.20\text{mm}$) -----	22
表 3.10 シミュレーション結果(四極電磁石水平/垂直設置誤差 $\pm 0.30\text{mm}$) -----	23
表 3.11 四極電磁石水平/垂直設置誤差 $\pm 0.10\text{mm}$ 、 $\pm 0.20\text{mm}$ 、 $\pm 0.30\text{mm}$ を与えた場合の比較 -----	23
表 3.12 シミュレーション結果(四極電磁石ロール誤差 $\pm 0.10^\circ$) -----	24
表 3.13 シミュレーション結果(四極電磁石ロール誤差 $\pm 0.15^\circ$) -----	25
表 3.14 シミュレーション結果(四極電磁石ロール誤差 $\pm 0.25^\circ$) -----	26
表 3.15 四極電磁石ロール誤差 $\pm 0.10^\circ$ 、 $\pm 0.15^\circ$ 、 $\pm 0.25^\circ$ を与えた場合の比較 -----	26
表 3.16 RF 誤差と四極電磁石誤差を与えた場合のシミュレーション結果 -----	28
表 3.17 RF 誤差と四極電磁石誤差を個別に与えた場合と同時に与えた場合の比較 -----	28

図 1.1 加速器構成概略図	31
図 2.1 β セクション分割例	31
図 2.2 キャビティ形状パラメータ	31
図 2.3 キャビティのジオメトリ	32
図 2.4 SUPERFISH 計算値と fitting 関数(電場)	33
図 2.5 SUPERFISH 計算値と fitting 関数($E_{\text{peak}}/E_0, R_sQ, Z/Q$)	34
図 2.6 ラティス構成	34
図 2.7 ラティス構成(トランスファー・マトリクス表現)	35
図 2.8 磁場による H 中性化	35
図 2.9 リファレンス加速器の設計値(ゲイン/キャビティ、ビーム・サイズ、 ゼロ・カレント波数及び四極電磁石磁場勾配)	36
図 2.10 β セクション数 5 の加速器の設計値(ゲイン/キャビティ、ビーム・サイズ、 ゼロ・カレント波数及び四極電磁石磁場勾配)	36
図 2.11 β セクション数 6 の加速器の設計値(ゲイン/キャビティ、ビーム・サイズ、 ゼロ・カレント波数及び四極電磁石磁場勾配)	37
図 2.12 β セクション数 7 の加速器の設計値(ゲイン/キャビティ、ビーム・サイズ、 ゼロ・カレント波数及び四極電磁石磁場勾配)	37
図 2.13 β セクション数 8 の加速器の設計値(ゲイン/キャビティ、ビーム・サイズ、 ゼロ・カレント波数及び四極電磁石磁場勾配)	38
図 2.14 β セクション数 9 の加速器の設計値(ゲイン/キャビティ、ビーム・サイズ、 ゼロ・カレント波数及び四極電磁石磁場勾配)	38
図 2.15 加速器構成検討結果	39
図 2.16 フェーズ・アドバンスとチューン・ディプレッション	39
図 3.1 rms ビーム・サイズ、rms エミッタンス及び Equipartitioning factor の履歴	40
図 3.2 入射ビーム位相空間分布	40
図 3.3 出力ビーム位相空間分布	41
図 3.4 四極電磁石の座標定義	41
図 3.5 RF 誤差及び四極電磁石誤差例	42
図 3.6 RF 電場/位相誤差を与えた場合のシミュレーション例	43
図 3.7 四極電磁石水平/垂直誤差を与えた場合のシミュレーション例	44
図 3.8 四極電磁石ロール誤差を与えた場合のシミュレーション例	45
図 3.9 RF 誤差及び四極電磁石誤差を与えた場合のシミュレーション例	46

1. 概 要

原研では、中性子を中心とした基礎研究の推進と消滅処理の工学的研究を目的として中性子科学研究計画を提案している。この計画の中核となるのは、加速エネルギー 1.5GeV、平均出力 8MW（平均加速電流 5.33mA）のパルス・ビーム及び連続(CW)ビームを出力する大強度陽子加速器である^[1]。

高エネルギー加速部（高 β リニアック部:100MeV～1.5GeV）には超伝導加速器を第一の選択としている。これは、CW 運転時に超伝導加速キャビティを使用する場合の方が、常伝導キャビティを使用する場合に比べて、電力消費を格段に少なくすることができるからである。また、超伝導加速キャビティのボア半径は常伝導加速キャビティに比べて大きくすることができるので、超伝導加速キャビティを使用することにより、ビーム・ロスの危険性を低減することができる。

本報告書は、超伝導加速器に関する概念設計検討についてまとめたものである^[2]。2章に加速器構成設計の考え方をまとめた。超伝導加速器の基本パラメータを表 1.1 に、加速器構成概略を図 1.1 に示す。現時点では、低エネルギー加速部(70keV～100MeV)に加速周波数 200MHz の高周波 4 重極型リニアック(RFQ)及びドリフト・チューブ・リニアック(DTL)を使用し、高エネルギー加速部(100MeV～1.5GeV)に加速周波数 600MHz の超伝導加速器を使用する構成となっている^[3]。超伝導加速器は 8 つの β セクション(β :粒子速度の光速度比)からなる設計とした。各セクションには図 1.1 のジオメトリカル β_g に最適化された 5セルキャビティを配置し、キャビティの最大表面電界は 16MV/m とした。設計の結果、キャビティの総数は 284 個となり、加速器長は 690m となった。ラティス・タイプはダブレット(FD0)収束とし、1 ラティスあたり 2 キャビティを配置した。エミッタンス・グロースを抑制するため、四極電磁石の磁場勾配は Equipartitioned 条件及び matched envelope equation によって導出した。3章に設計した加速器のビーム・ダイナミクス・シミュレーションによる評価をまとめた。ビーム・ダイナミクス・シミュレーションでは横と縦の rms エミッタンス増加はいずれも 1%程度となった。また、RF 及び四極電磁石に誤差がある場合の加速器性能について、ビーム・ダイナミクス・シミュレーションを行い評価した。

表 1.2 に本報告書で使用される主な記号と略語のリストを示す。

表 1.1 超伝導加速器の基本パラメータ

加速粒子	H ⁺ , H ⁻	E _{acc}	2.4~8.0MV/m
周波数	600MHz	βセクション数	8
エネルギー範囲	100MeV~1.5GeV	キャビティ数	284
β範囲	0.428~0.923	ラティス間隔	4.11~5.30m
最大ビーム電流(ハルス)	30mA	加速器長	690m
CW ビーム電流	5.3mA	1 ラティス区間あたりの 横方向フェーズ・アドバンス	64~16° (σ ₁₀ :ゼロ・カレント) 39~9° (σ ₁ :スペース・チャージ)
ビーム・パワー	8MW	1 ラティス区間あたりの 縦方向フェーズ・アドバンス	48~11° (σ ₁₀ :ゼロ・カレント) 27~6° (σ ₁ :スペース・チャージ)
セル/キャビティ	5	ラティス・タイプ	ダブルレット(FD0)収束
キャビティラティス	2		σ _r /σ ₁₀ , σ _t /σ ₁₀
同期位相	-30°		磁場勾配
最大表面電場	16MV/m		Trans. rms emittance
運転温度	2K		Long. rms emittance

表 1.2 本報告書で使用される主な記号と略語

β	粒子速度の光速度比	I	電流[A]
β _g	キャビティ・ジオメトリカルβ。キャビティに同期する粒子のβを指す。セル長 L=β _g λ/2 (エント・セルを除く)。	q	粒子電荷[C]
ε	エミッタンス[πcm-mrad],[πMeV-deg]	k _x	横方向波数[rad/m]
φ	同期位相[deg]	k _z	縦方向波数[rad/m]
γ	ローレンツ・ファクタ γ=(1-β ²) ^{-1/2}	N	バンチあたりの粒子数 N=I/qf
η	チューン・ディプレッション	Q	Q=ω・(キャビティ蓄積エネルギー)/(平均エネルギー損失)
λ	RF 波長[m]	r _c	Classical particle radius[m]
σ _r , σ _x	横方向フェーズ・アドバンス[deg]	R _s	表面抵抗[Ω]
σ _t , σ _z	縦方向フェーズ・アドバンス[deg]	R _s Q	ジオメトリカル・ファクタ[Ω]
τ _{beta}	ベータトロン周期[s]	S	トランジット・タイム・ファクタ
τ _{plasma}	プラズマ周期[s]	T	トランジット・タイム・ファクタ
ω	角周波数ω=2πf[rad/s]	Z	シャント・インピーダンス[Ω/m]
a	横方向ビーム・サイズ [m]	Z _m	縦方向ビーム・サイズ [m]
B	磁場勾配[T]	CW	Continuous wave
c	光速度 2.99792458×10 ⁸ m/s	DTL	Drift tube linac
E ₀	キャビティのビーム軸上の平均電場 [MV/m]。ここでは E ₀ =(キャビティにかかる電圧)/(キャビティのセル部の長さ)とした。	FD0	Focusing region, defocusing region, and the gaps with their associated field free regions.
E _{acc}	平均加速電場 E _{acc} =E ₀ ・T[MV/m]	RF	Radiofrequency
E _{peak}	キャビティの最大表面電場[MV/m]	RFQ	Radiofrequency quadrupole linac
f	RF 周波数[Hz]	RMS	Root mean square

2. 超伝導加速器の構成検討

本章では与えられた加速エネルギーをいくつかのセクション (β セクション) に分割し、各セクションに個別のジオメトリカル β_g を有するキャビティを割り当てる一方法案を示す。また、ビーム・ダイナミクス・パラメータの fitting 関数、Equipartitioned 条件を満たすラティス構成設計案を示す。さらに加速器長、 β セクション数及びビームの質を考慮して設計した加速器構成案を示す。

2.1 β セクション分割とキャビティ・ジオメトリカル β_g の割り当て

陽子加速器の場合、エネルギーが 100MeV から 1.5GeV まで変化する間に粒子速度の光速速度比 β は 0.428 から 0.923 まで変化するのので、RF 位相と同期をとるために加速構造も順次変える必要がある。ビームの速度に同期するキャビティを全て用意するのが理想的であるが、経済性より、あるエネルギー範囲(β セクション)で同じ形のキャビティを使うことを考える。

一つの β セクション内で同じ形のキャビティを使う場合、バンチ速度は必ずしもキャビティ内の RF 位相と同期せず、位相スリップが生じる。位相スリップが大きいとエンド・セルにおける位相条件が悪くなり、これが縦方向のビームの質を悪化させる要因となるので、 β セクション分割とキャビティのジオメトリカル β_g の割り当ては RF 位相に対するバンチの位相スリップに注目して検討することとした。

キャビティのビーム軸上の電場が 2セルを 1 周期とする正弦又は余弦カーブで表されるとする。粒子速度の光速速度比が β のとき、ジオメトリカル β_g のキャビティに対する 1セルあたりの位相スリップ $\Delta\phi$ は式(2.1)で表される。

$$\Delta\phi = \pi \left(\frac{\beta_g}{\beta} - 1 \right) \quad [\text{rad}] \quad (2.1)$$

ある β セクションの位相スリップが突出して大きくならないように、 β セクション分割及びキャビティ・ジオメトリカル β_g の割り当てを行うことを考える。これは各 β セクションの最大位相スリップを等しくすることと等価であり、各 β セクション内の最大位相スリップは β セクションの入口または出口の部分で生じるので、式(2.2)の関係を満たす加速器構成を設計することになる。

$$\frac{\beta_{g1}}{\beta_0} = \frac{\beta_{g2}}{\beta_1} = \Lambda = \frac{\beta_{gn}}{\beta_{n-1}} = \frac{\beta_{g1}}{\beta_1} = \frac{\beta_{g2}}{\beta_2} = \Lambda = \frac{\beta_{gn}}{\beta_n} \quad (2.2)$$

ここで、 n : β セクション数、 β_0, K, β_n : β セクションの境界、

$\beta_{g1}, K, \beta_{gn}$:各 β セクションのキャビティ・ジオメトリカル β_g

式(2.2)を解くと式(2.3)~(2.6)が導出され、これにより加速器のエネルギー範囲と β セクション分割数を与えると各 β セクションの最大位相スリップが同じとなる β セクション分割とキャビティ・ジオメトリカル β_g の割り当てを行うことができる。

$$\beta_1 = (\beta_0^{n-1} \beta_n)^{1/n} \quad (2.3)$$

$$\beta_k = \beta_1 (\beta_1 / \beta_0)^{k-1} \quad (k = 2, K, n-1) \quad (2.4)$$

$$\beta_{gk} = \beta_{g1} (\beta_1 / \beta_0)^{k-1} \quad (k = 2, K, n) \quad (2.5)$$

$$\beta_{g1} = \frac{2\beta_0}{\sqrt[n]{(\beta_0 / \beta_n)^{n+1} + (\beta_0 / \beta_n)}} \quad (2.6)$$

式(2.3)及び(2.4)に基づいた β セクション分割例を図 2.1 に示す。超伝導キャビティの場合、ボア半径が比較的大きいため、キャビティからビーム・パイプへの電場の漏れがあり、エンド・セルのビーム軸上の電場が正弦又は余弦カーブとは異なった形状をしている。このため実際の設計では、式(2.3)～(2.6)で求めた β セクション及びキャビティのジオメトリカル β_g を若干修正する必要がある。

2.2 ビーム・ダイナミクス・パラメータ検討

加速器構成検討を定量的に行うため、表 2.1 (各パラメータは図 2.2 参照) に示す 8 種類の 5 セル・キャビティを SUPERFISH 及び MAFIA で設計し、キャビティ・ジオメトリカル β_g を変数とするビーム・ダイナミクス・パラメータについての fitting 関数を用意することとした。用意した fitting 関数はビーム軸上の電場、最大表面電場(E_{peak})/軸上の平均電場(E_0)、キャビティのジオメトリカル・ファクタ R/Q 及びキャビティの Z/Q である。キャビティ及びセルのトランジット・タイム・ファクタについては電場の fitting 関数より求めた。なお、5 セル・キャビティの設計指針は下記のとおりとした。

- (1) 共振周波数 600MHz
- (2) セル数 5
- (3) テーパー角 θ は、 $\beta_g=0.43$ で 5° 、 $\beta_g=0.92$ で 10° とし、その間を線形に補間する。
- (4) アイリス楕円半径は、 $R_1=0.28L$, $R_2=2 R_1$ で決定する。
- (5) センター・セル長及び 2nd セル長は、 $L=\beta_g \lambda / 4$ (λ :RF 波長)で与えられる。
- (6) アイリス半径は、 $a=7.5\text{cm}$ とする。
- (7) アイリス部直線長は、 $L_1=0.2\text{cm}$ とする。
- (8) センター・セル及び 2nd セルの赤道部直線長は、 $L_2=0.5\text{cm}$ とする。
- (9) キャビティ内軸上電場分布は、各セルの中心におけるピーク値がほぼ一致するように調整する。その際に、エンドセルの赤道部直線長 L_2' のみを変化させる。

超伝導キャビティはボア半径が大きいため、電場がキャビティからビーム・パイプへ漏れやすい。この漏れ電場はビームの縦方向に影響を与えるので、ビーム・パイプの一部をバーチャル・セルとして取り扱い、ビーム・ダイナミクスの計算を行った。求めた fitting 関数は

表 2.1 キャビティ形状パラメータ

β_g	0.453	0.499	0.549	0.604	0.665	0.732	0.805	0.886
L[cm]	5.6586	6.2332	6.8578	7.5448	8.3067	9.1437	10.0555	11.0673
a[cm]	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
b[cm]	22.7974	22.6897	22.5911	22.5006	22.4202	22.3510	22.2934	22.2477
R[cm]	2.4509	2.8559	3.3081	3.8202	4.4055	5.0695	5.8183	6.6801
R_1 [cm]	1.5844	1.7453	1.9202	2.1125	2.3259	2.5602	2.8156	3.0988
R_2 [cm]	3.1688	3.4906	3.8404	4.2250	4.6518	5.1204	5.6312	6.1976
θ [°]	5.235	5.704	6.214	6.775	7.399	8.082	8.826	9.653
L_2 [cm]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
L_2' [cm]	0.2840	0.2676	0.2544	0.2516	0.2508	0.2563	0.2664	0.2748

下記のとおりである。

- (1) キャビティ軸上の規格化電場 $E(z)$ は偶関数であり次で表されるものとする。ただし、 $E(0)=1$ 、 z の単位は cm、ジオメトリは図 2.3 のとおりであり、ビーム・パイプ部のバーチャル・セルはセンター・セル長分を考慮するものとする。また、 β_g : キャビティ: ジオメトリカル β , $\lambda=c/f$ [cm], c : 光速, $f=600\text{MHz}$ 。

バーチャル・セル (区間 B_1 [cm]~ E_1 [cm])

$$E(z)=1.26^{(z+57.32082\beta_g+0.09163)} \quad (2.7)$$

エンド半セル 1 (区間 E_1 [cm]~ $E_M+\Delta$ [cm])

$$E(z)=\cos((z+B_e)/A_e)+0.015(z+B_e) \quad (2.8)$$

エンド半セル 2 (区間 $E_M+\Delta$ [cm]~ S_2 [cm])

$$\begin{aligned} E(z)= & \cos(2\pi(z-E_M-\Delta)/(S_2-E_M-\Delta)/4) \\ & -A(-1+\cos(3\times 2\pi(z-E_M-\Delta)/(S_2-E_M-\Delta)/4)) \\ & -B(z-E_M-\Delta)^2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

2nd セル (区間 S_2 [cm]~ S_1 [cm])

$$\begin{aligned} E(z)= & P \cdot \cos(2\pi z/(\beta_g \lambda)) \\ & +A(-1+\cos(3\times 2\pi(z+\beta_g \lambda/2)/(\beta_g \lambda))) \\ & +B(z+\beta_g \lambda/2)^2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

センター半セル (区間 S_1 [cm]~0)

$$\begin{aligned} E(z)= & \cos(2\pi z/(\beta_g \lambda)) \\ & -A(-1+\cos(3\times 2\pi z/(\beta_g \lambda))) \\ & -B z^2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

ここで

$$B_1=-(\beta_g \lambda/2 \times 7/2 - 2 \times 0.5 + 2 \times E_p) \quad [\text{cm}]$$

$$\begin{aligned}
E_1 &= -(\beta_g \lambda / 2 \times 5 / 2 - 2 \times 0.5 + 2 \times E_p) \quad [\text{cm}] \\
E_M &= -(\beta_g \lambda / 2 \times 4 / 2 - 0.5 + E_p) \quad [\text{cm}] \\
\Delta &= -1.99739 \beta_g^2 + 3.99316 \beta_g - 2.50346 \quad [\text{cm}] \\
S_2 &= -\beta_g \lambda / 2 \times 3 / 2 \quad [\text{cm}] \\
S_1 &= -\beta_g \lambda / 2 \quad [\text{cm}] \\
E_p &= -1.7265 \beta_g^3 + 4.07136 \beta_g^2 - 3.0701 \beta_g + 0.99977 \quad [\text{cm}] \\
A_e &= 8.86235 \beta_g + 1.73473 \\
B_e &= 50.39771 \beta_g + 0.57309 \\
A &= 0.08331 \beta_g - 0.03059 \\
B &= 0.01122 \beta_g^3 - 0.02631 \beta_g^2 + 0.02071 \beta_g - 0.00515 \\
P &= -2.13521 \beta_g^4 + 6.53697 \beta_g^3 - 7.40341 \beta_g^2 + 3.70889 \beta_g + 0.29291
\end{aligned}$$

(2) E_{peak}/E_0 は次で表されるものとする。

$$\begin{aligned}
E_{\text{peak}}/E_0 &= 47.33399 \beta_g^4 - 149.19769 \beta_g^3 + 180.16545 \beta_g^2 \\
&\quad - 101.11429 \beta_g + 24.22104 \quad (2.12)
\end{aligned}$$

ここで、 $E_0 = (\text{キャビティにかかる電圧}) / (\text{キャビティのセル部の長さ})$ [MV/m] とする。

(3) ジオメトリカル・ファクタ $R_s Q$ [Ω] は次で表されるものとする。

$$R_s Q = 255.33702 \beta_g + 10.51423 \quad [\Omega] \quad (2.13)$$

(4) Z/Q [Ω/m] は次で表されるものとする。

$$Z/Q = -583.29843 \beta_g^2 + 2020.82362 \beta_g - 546.46461 \quad [\Omega/\text{m}] \quad (2.14)$$

電場については積分が解析的にできる形にするために、多項式、余弦関数及び指数関数を用いて試行錯誤的に fitting 関数を求めた。その他のパラメータについては適当な次数の多項式最小二乗法で fitting 関数を求めた。表 2.1 の 8 個の空洞に対する各パラメータと式(2.7)～式(2.14)の fitting 関数を図 2.4 及び図 2.5 に示す。

2.3 ラティス構成検討

超伝導状態を保つためにキャビティはクライオモジュールの中に装備されるが、収束用電磁石はアクセスを容易にするためにクライオモジュールの外に装備することを想定した。これにより収束区間が比較的長くなるため、ラティス・タイプはダブルレット(FD0)収束とした。キャビティや四極電磁石の装備位置はクライオモジュールの設計により決められるが、ここでは図 2.6 に示されるような配置を想定し、1 ラティスあたり 2 キャビティとした。キャビティ間距離は RF インプット・カプラが装備できるようにするために、また、キャビティ間のカップリングがほとんど起こらないようにするために 50cm とした。キャビティ-四極電磁石間距離はクライオモジュールの断熱及びゲート・バルブの装備を考慮して 70cm とした。

表 2.2 スペース・チャージ力によるエミッタンス・グロースの主なメカニズム^[4]

	Charge redistribution	RMS Mismatch	Thermal energy transfer	Structure Resonance
エネルギー源	非均一フィールド・エネルギー	ポテンシャル・エネルギー	他位相空間の熱エネルギー	指向性エネルギー
時間スケール	$\sim \tau_{\text{plasma}} / 4$	$\sim 10 \tau_{\text{plasma}}$	$\sim 10 \tau_{\text{plasma}}$	$\sim 2 \tau_{\text{betatron}}$
粒子分布依存性	強い	弱い	弱い	強い
対処法	一様分布又は internal match, チューン・ディフレクション値大 ^[5]	RMS match	Equipartition	$\sigma_0 < 90^\circ$

四極電磁石間距離は真空系やビーム診断系の装備を考慮して 50cm とした。

超伝導加速器の出力ビームは蓄積リングに入射されるので、横方向及び縦方向エミッタンスの増加を極力抑えなければならない。スペース・チャージ力によるエミッタンス・グロースの主なメカニズムは表 2.2 に示すとおりであり、ラティス構成に関しては RMS mismatch, Thermal energy transfer 及び Structure resonance に留意する必要がある。ここでは横方向及び縦方向のエミッタンス増加を最小とするために、超伝導加速器の四極電磁石磁場勾配は Equipartitioned 条件と matched envelope equation から導くものとし、ゼロ・カレント・フェーズ・アドバンスが 90° を超えないように留意するものとした。また、RMS mismatch を抑えるために、超伝導加速器内のフェーズ・アドバンスの急激な変化はできるだけ起こらないように留意するものとした。

Equipartitioned 条件は、粒子のプラズマ温度を横と縦で等しく保つことを差し、この条件によって、熱エネルギーの遷移によるエミッタンス・グロースを抑えることができる^[6]。

Equipartitioned 条件は次式で定式化される。

$$\gamma_0 \frac{\epsilon_{nx} z_m}{\epsilon_{nz} a} = 1 \quad (2.15)$$

ここで

ϵ_{nx} : 横方向規格化エミッタンス, ϵ_{nz} : 縦方向規格化エミッタンス

a : 横方向ビーム・サイズ, z_m : 縦方向ビーム・サイズ

横と縦のビーム・サイズは matched envelope equation により次のように表される。

$$a \approx \left[\left(\frac{3}{2} \right)^2 \frac{Nr_c}{\beta_0^2 \gamma_0^2 k_{z0}^2} \left(\frac{k_{x0}^2}{k_{z0}^2} + \frac{1}{2} \right)^{-2} + \left(\frac{\epsilon_{nx}}{\beta_0 \gamma_0 k_{x0}} \right)^{3/2} \right]^{1/3} \quad (2.16)$$

$$z_m \approx \left[\frac{2}{3} \frac{Nr_c}{\beta_0^2 \gamma_0^2 k_{z0}^2} \left(\frac{k_{x0}^2}{k_{z0}^2} + \frac{1}{2} \right) + \left(\frac{\epsilon_{nz}}{\beta_0 \gamma_0^3 k_{z0}} \right)^{3/2} \right]^{1/3} \quad (2.17)$$

ここで

β_0 : モーメント中心粒子の光速度比, γ_0 : モーメント中心粒子のローレンツ・ファクタ, $\gamma_0 = (1 - \beta_0^2)^{-1/2}$

k_{x0} : 横方向のゼロ・カレント波数, k_{z0} : 縦方向のゼロ・カレント波数,

N : バンチあたりの粒子数, $N = I/qf$, r_c : Classical parctical radius, $r_c = q^2/4\pi\epsilon_0 mc^2$

q : 粒子電荷, m : 粒子質量, c : 光速度,

I : ビーム電流, f : RF周波数

また、縦方向のゼロ・カレント波数 k_{z0} は式(2.18)で表される。

$$k_{z0} = \left[-\frac{q}{mc^2} \frac{2\pi}{\lambda} \frac{1}{\beta_0^3 \gamma_0^3} \frac{1}{L_{total}} \sum_{i=1}^n E_{0i} L_i (T_i \sin \phi_i + S_i \cos \phi_i) \right]^{1/2} \quad (2.18)$$

ここで

λ : RF波長, L_{total} : 収束区間長, n : 1ラティス内のセルの数, L_i : 1ラティス内の i 番目のセル長,

E_{0i} : 1ラティス内の i 番目のセルの電場, ϕ_i : 1ラティス内の i 番目のセルの同期位相,

T_i, S_i : 1ラティス内の i 番目のセルのトランジット・タイム・ファクタ

$$T_i = \frac{\int_{-L_i/2}^{L_i/2} E(z) \cos(2\pi z / \beta_0 \lambda) dz}{\int_{-L_i/2}^{L_i/2} E(z) dz}, \quad S_i = \frac{\int_{-L_i/2}^{L_i/2} E(z) \sin(2\pi z / \beta_0 \lambda) dz}{\int_{-L_i/2}^{L_i/2} E(z) dz},$$

$E(z)$: セルの軸上電場。 z はセルの中心が原点。

ラティス構成を決め、セルの加速電場、セル長、トランジット・タイム・ファクタ及び加速位相を与えると式(2.16)、(2.17)及び(2.18)より縦方向のゼロ・カレント波数 k_{z0} が求まり、式(2.15)より Equipartitioned 条件を満たす横方向のゼロ・カレント波数 k_{x0} が求まる。横方向ゼロ・カレント・フェーズ・アドバンス $\sigma_{x0} = k_{x0} L_{total}$ と収束区間のトランスファー・マトリクス M との関係は式(2.19)で表される。

$$\cos \sigma_{x0} = \text{Tr}(M)/2 \quad (2.19)$$

ビーム・パイプの一部をセルとして考え1ラティスあたり7セル・キャビティが2個あるとし、図2.7に示すダブルレット構造を考えると、収束区間のトランスファー・マトリクス M は式(2.20)で表される。本報告書では、式(2.15)を $|y_0 \epsilon_{nz} z_m / (e_{nz} a) - 1| < \delta_1$ 、式(2.19)を $|\cos \sigma_{x0} - \text{Tr}(M)/2| < \delta_2$ と変更しこれを満たす四極電磁石磁場勾配 B_0 を、数値計算を繰り返すことにより求めた。

$$M = D_4 Q_D D_3 Q_F D_2 G_{14} \Lambda \quad G_8 D_1 G_7 \Lambda \quad G_1 \quad (2.20)$$

ここで、

$$G_i = \begin{pmatrix} 1 + L_i \cdot k_i / 2 & L_i \\ k_i & 1 + L_i \cdot k_i / 2 \end{pmatrix}, \quad k_i = \frac{-\pi q E_{0i} L_i (T_i \sin \phi_i + S_i \cos \phi_i)}{mc^2 \lambda \beta_0^3 \gamma_0^3} \quad (2.21)$$

$$D_i = \begin{pmatrix} 1 & L_{Di} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

$$Q_F = \begin{pmatrix} \cos \sqrt{k} L_{QF} & \frac{1}{\sqrt{k}} \sin \sqrt{k} L_{QF} \\ -\sqrt{k} \sin \sqrt{k} L_{QF} & \cos \sqrt{k} L_{QF} \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

$$Q_D = \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{k} L_{QD} & \frac{1}{\sqrt{k}} \sinh \sqrt{k} L_{QD} \\ \sqrt{k} \sinh \sqrt{k} L_{QD} & \cosh \sqrt{k} L_{QD} \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

$$k = \frac{qcB_0}{mc^2 \beta_0 \gamma_0} \quad (2.25)$$

ここで、

L_i :セル長, L_{Di} :ドリフト・スペース長, L_{QF}, L_{QD} :磁石長, B_0 :磁場勾配

四極電磁石の磁場勾配は、マグネチック・ストリッピングによる H^- ビーム中性化が極力起きないように決めなければならない。マグネチック・ストリッピングによる 1m あたりの H^- 減少率 L_r は式(2.26)で表され^[7]、たとえばエネルギー 1.5GeV で 0.21T の磁場があると H^- の減少率は $10^{-8}/m$ となる。粒子エネルギー、磁場勾配及び H^- 減少率は図 2.8 に示すとおりであり、四極電磁石長はこの制約に留意して決めることとした。

$$L_r = (B/A_1) \exp[-A_2/(\beta\gamma cB)] \quad [1/m] \quad (2.26)$$

ここで、 B :磁場強度[T], $A_1 = 2.47 \times 10^{-6} [V \cdot s/m]$, $A_2 = 4.49 \times 10^9 [V/m]$,

β : 粒子の光速度比, γ :ローレンツ・ファクタ

2.4 加速器構成検討

加速器構成検討を行う際の基本パラメータを表 2.3 に示す。加速器構成を検討するにあたって、下記を考慮するものとした。

- (1) 加速器長はできるだけ短くする。
- (2) β セクション数はできるだけ少なくする。
- (3) ビームの質はできるだけ悪化させないようにする。

β セクションが少なくなると、量産効果が大きくなる、 β セクション間のトランジッションが少なくなる、必要なスペアの種類が少なくなるといったメリットがある。その一方で、 β セクション数が少なくなると位相スリップが大きくなり、加速効率が悪くなるとともに、ビームの質が悪くなることから、(1)と(2)あるいは(2)と(3)は互いに背反する関係にある。よってこれらの条件をうまく満たすような加速器構成を得ることを目標とした。

表 2.3 加速器の基本パラメータ

加速粒子	H^+, H^-	キャビティ最大表面電界	16MV/m
加速周波数	600MHz	セル/キャビティ	5
加速エネルギー	100MeV~1.5GeV	キャビティ/ラティス	2
ビーム・ピーク電流	30mA	ラティス・タイプ	ダブルレット(FDO)収束

β セクション数が最大になるのは個々のキャビティがバンチ速度に同期する形状となる場合であり、この加速器の加速効率及びビームの質は優れているものと考えられる。よって、加速器構成を検討するにあたって加速器長とビームの質の基準を設けるため、入射バンチ速度に同期する5セル・キャビティから成る加速器をリファレンスとして用意した。リファレンスとなる加速器の加速位相は -30° に設定し、ラティス構成は、図2.6のとおりとし、Hのマグネチック・ストリッピングに留意して、90ラティスまでは四極電磁石長を30cm、それ以降は30cm~35cmとした。磁場勾配を設定するにあたって、入射ビームの規格化rmsエミッタンスを横 $0.04\pi\text{cm}\cdot\text{mrad}$ 、縦 $0.42\pi\text{MeV}\cdot\text{deg}$ と設定した。以上の条件下でリファレンス加速器のキャビティ数は281すなわち β セクション数は281、加速器長は680mとなった。リファレンスの加速器設計値（ゲイン/キャビティ、ビーム・サイズ、ゼロ・カレント波数及び四極電磁石磁場勾配）を図2.9に示す。

選択する加速器構成は、リファレンスの加速器の加速器長とビームの質（ここではエミッタンス・グロースを尺度とした）がほぼ同じとなる最少数の β セクションを有するものとし、次の条件で β セクション数5~9の加速器構成を検討した。

- (1) β セクション、ビーム・ダイナミクス・パラメータ、ラティスは前節までに述べた方法で決める。
- (2) キャビティ/クライストロンは4とし、1クライストロン下の4キャビティには同じパワーを供給するものとする。また、4キャビティの最大表面電界は16MV/mとする。
- (3) 位相スリップはエンド・セルやバーチャル・セルでの位相条件を悪化させるので、同期位相は縦方向のrmsエミッタンスがリファレンスのものとほぼ同じになるように決める。
- (4) マグネチック・ストリッピングによるH減少率がビーム軸から5cmのところでは $10^{-8}/\text{m}$ 以下となるようにする。このため、最終 β セクションの磁極長は35cm又は40cmとし、それ以外の β セクションでは30cmとする。

図2.10~図2.14に β セクション数5~9の加速器の設計値（ゲイン/キャビティ、ビーム・サイズ、ゼロ・カレント波数及び四極電磁石磁場勾配）を示す。また、表2.4~表2.8に β セクション数5~9の加速器のキャビティ・ジオメトリカル β_g 、 β セクション範囲、加速位相、キャビティ数及び四極電磁石長を示す。

表2.4 β セクション数5の加速器の β_g 、 β セクション範囲、加速位相、キャビティ数及び四極電磁石長

β_g	0.465	0.541	0.627	0.724	0.838
β セクション範囲 [MeV]	100.0~144.0	144.0~ 211.7	211.7~ 323.2	323.2~548.2	548.2~ 1500.0
加速位相[$^\circ$]	-40	-40	-40	-40	-40
キャビティ数	36	36	40	56	164
Qマグネット長 [cm]	30	30	30	30	40

表 2.5 β セクション数 6 の加速器の β_g 、 β セクション範囲、加速位相、キャビティ数及び四極電磁石長

β_g	0.460	0.519	0.592	0.670	0.765	0.869
β セクション範囲 [MeV]	100.0~ 132.8	132.8~ 186.6	186.6~ 263.5	263.5~ 396.6	396.6~ 669.5	669.5~ 1500.0
加速位相[°]	-40	-40	-40	-40	-37	-35
キャビティ数	28	32	32	40	56	124
Q マグネット長 [cm]	30	30	30	30	30	35

表 2.6 β セクション数 7 の加速器の β_g 、 β セクション範囲、加速位相、キャビティ数及び四極電磁石長

β_g	0.457	0.509	0.567	0.635	0.706	0.788	0.877
β セクション範囲 [MeV]	100.0~ 129.7	129.7~ 170.4	170.4~ 235.3	235.3~ 322.8	322.8~ 460.6	460.6~ 729.2	729.2~ 1500.0
加速位相[°]	-35	-35	-35	-35	-30	-30	-30
キャビティ数	24	24	28	28	32	48	108
Q マグネット長 [cm]	30	30	30	30	30	30	35

表 2.7 β セクション数 8 の加速器の β_g 、 β セクション範囲、加速位相、キャビティ数及び四極電磁石長

β_g	0.453	0.499	0.549	0.604	0.665	0.732	0.805	0.886
β セクション範囲 [MeV]	100.0~ 125.7	125.7~ 159.6	159.6~ 204.0	204.0~ 273.3	273.3~ 362.2	362.2~ 511.7	511.7~ 795.1	795.1~ 1500.0
加速位相 [°]	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30
キャビティ数	20	20	20	24	24	32	48	96
Q マグネット 長[cm]	30	30	30	30	30	30	30	35

表 2.8 β セクション数 9 の加速器の β_g 、 β セクション範囲、加速位相、キャビティ数及び四極電磁石長

β_g	0.451	0.487	0.529	0.581	0.634	0.688	0.750	0.817	0.890
β セクション範囲 [MeV]	100.0~ 120.1	120.1~ 145.2	145.2~ 185.3	185.3~ 237.0	237.0~ 302.0	302.0~ 398.3	398.3~ 557.0	557.0~ 826.0	826.0~ 1500.0
加速位相 [°]	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30
キャビティ数	16	16	20	20	20	24	32	44	92
Q マグネット 長[cm]	30	30	30	30	30	30	30	30	35

β セクション数 5~9 の加速器長及び、超伝導キャビティ・ビーム・シミュレーション用に修正した PARMILA によるビーム・シミュレーション結果を図 2.15 に示す。加速器長は β セクション数が多くなるほど短くなり、 β セクション数が 8 以上でリファレンス加速器長とほぼ同じとなった。また、エミッタンス・グロースは β セクション数が 6 以上で横方向、縦方向ともに 1%程度であり、リファレンス加速器とほぼ同じになった。よって、リファレンス

の加速器の長さとおミッタンス・グロースがほぼ同じとなる最少 β セクション数は8であり、 β セクション数8の加速器構成をメイン・オプションとして選択することとした。 β セクション数8の加速器はキャビティ数284となり、加速器長は690mとなった。ラティス間隔及び E_{acc} は表2.9に示すように4.11m~5.30m、2.4~8.0MV/mとなった。四極電磁石の磁場勾配は3.6~5.5T/mとなり、これは与えられたH減少率を満たすものとなった。

β セクション数8の加速器のフェーズ・アドバンス及びチューン・ディプレッションを図2.16に示す。ゼロ・カレント・フェーズアドバンスは横:64°~16°、縦:39°~9°となり、Structure resonanceによるおミッタンス・グロースは抑制されることが期待される。規格化rmsおミッタンス横:0.04 π cm-mrad、縦0.42 π MeV-deg、ビーム電流90mAに対するチューン・ディプレッションは横・縦ともに0.6前後と比較的大きく、Charge redistributionによるおミッタンス・グロースは抑制されることが期待される。また、 β セクション間のフェーズ・アドバンスのギャップは横、縦とも小さいものとなっており、RMS mismatchによるおミッタンス・グロースは小さいものと期待される。さらに、四極電磁石の磁場勾配はEquipartitioned条件を満たすように設定されているので、Thermal energy transferによるおミッタンス・グロースは抑制されることが期待される。 β セクション数8の加速器のダイナミカル・パラメータ及びラティス・パラメータ(抜粋)を付録Aに示す。

表2.9 β セクション数8の E_{acc} 及びラティス間隔

β_g	0.453	0.499	0.549	0.604	0.665	0.732	0.805	0.886
E_{acc} [MV/m]	2.4~ 2.9	2.9~ 3.4	3.4~ 4.1	4.0~ 4.8	4.8~ 5.5	5.4~ 6.3	6.3~ 7.2	7.1~ 8.0
ラティス長 [m]	4.11	4.23	4.35	4.49	4.64	4.81	4.99	5.30

3. ビーム・ダイナミクス・シミュレーション

本章では、2章で設計した加速器構成の性能を評価するために行ったビーム・ダイナミクス・シミュレーションについて示す。ビーム・ダイナミクス・シミュレーションは誤差を与えない場合と RF 誤差及び四極電磁石誤差を与える場合とを行った。

3.1 シミュレーション(無誤差)

2章で検討した 8 個の β セクションを有する加速器の性能を確認するため、ビーム・ダイナミクス・シミュレーションを行った。ビーム・ダイナミクス・シミュレーションは、超伝導キャビティ用に修正した PARMILA を用いて行った。入射ビームの規格化 rms エミッタンスは横 $0.04\pi\text{cm-mrad}$ 、縦 $0.421\pi\text{MeV-deg}$ とした。DTL と超伝導加速器の間には 3 倍の周波数ジャンプがあるので、ビーム電流を $90\text{mA}(=30\text{mA}\times 3)$ とした。

rms ビーム・サイズ、規格化 rms エミッタンス及び、式(2.15)の左辺で定義される Equipartitioning factor を図 3.1 に示し、入射ビームと出力ビームの位相空間分布を図 3.2 と図 3.3 に示す。ここで横方向の規格化 rms エミッタンスは X 方向と Y 方向の規格化 rms エミッタンスの二乗平均とした。横方向 rms ビーム・サイズは $1.6\sim 3.1\text{mm}$ で、ラティス区間を 1 周期として振動しながら、一旦減少した後に少々増加しており、多少の mismatches のためにベータトロン振動がみられる。縦方向 rms ビーム・サイズは 3.1mm から 1.1mm に減少しており、初期段階に mismatches のために振動がみられる。横方向及び縦方向の rms ビーム・サイズは matched envelope equation から求めた設計値 (図 2.13 参照) とほぼ同様な傾向で変化している。

横方向及び縦方向の規格化 rms エミッタンスは、初期段階で Charge redistribution により振動した後にはほぼ一定となっており、出力部で横 $0.0404\pi\text{ cm-mrad}$ 、縦 $0.425\pi\text{ MeV-deg}$ となった。エミッタンス・グロースは横・縦共に 1%程度であり、これは下記要因により達成されたと考えられ、本加速器構成の有効性が確認できた。

- (1) ゼロ・カレント・フェーズ・アドバンスは横: $64^\circ\sim 16^\circ$ 、縦: $39^\circ\sim 9^\circ$ であり、Structure resonance によるエミッタンス・グロースは抑制されている。
- (2) ビーム電流 90mA に対するチューン・ディプレッションは横・縦ともに 0.6 前後と比較的大きく、Charge redistribution によるエミッタンス・グロースは抑制されている。
- (3) フェーズ・アドバンスの β セクション間でのギャップは横、縦とも小さいものとなっており、RMS mismatch によるエミッタンス・グロースは小さいものとなっている。
- (4) 四極電磁石の磁場勾配は Equipartitioned 条件を満たすように設定されているので、Thermal energy transfer によるエミッタンス・グロースは抑制されている。

3.2 シミュレーション(含誤差)

8個の β セクションの加速器について、キャビティ内のRF誤差及び四極電磁石誤差を含むときの加速器性能を調べた。誤差は与えられた範囲内で一様分布となる乱数とした。各ケースについて誤差の初期値の異なる20個のシミュレーションを行って比較検討した。四極電磁石の座標は図3.4とした。与えたRF電場誤差、RF位相誤差、四極電磁石水平/垂直設置誤差、四極電磁石ロール誤差の例を図3.5に示す。

3.2.1 RF電場/位相誤差

RF電場誤差のみを $\pm 1.0\%$ 、RF位相誤差のみを $\pm 1.0^\circ$ で個別に与えた場合を調べ、次にRF電場/位相誤差を同時に $\pm 1.0\%/ \pm 1.0^\circ$ 、 $\pm 2.0\%/ \pm 2.0^\circ$ 、 $\pm 3.0\%/ \pm 3.0^\circ$ 以内で与えた場合を調べた。

キャビティ内のRF電場誤差のみを $\pm 1.0\%$ 以内で与えた場合のシミュレーション結果を表3.1に、RF位相誤差のみを $\pm 1.0^\circ$ 以内で与えられた場合のシミュレーション結果を表3.2に示す。また、表3.3に両者の比較をまとめる。両者とも横方向rmsエミッタンスにはほとんど影響を与えない結果となった。縦方向rmsエミッタンス増加についてはRF電場誤差のみの場合はほとんど影響を与えない結果となったが、RF位相誤差を与えた場合は最大2%増加する結果となった。出力バンチ中心エネルギー変位はRF電場誤差のみの場合は $1\sigma=0.70\text{MeV}$ 、RF位相誤差のみの場合は $1\sigma=0.64\text{MeV}$ となり、同程度の影響を与える結果となった。出力バンチrmsエネルギー幅に関してはRF電場誤差のみの場合はほとんど影響を与えない結果となったが、RF位相誤差のみの場合は $0.46\sim 0.54\text{MeV}$ と変化した。

次に、キャビティ内のRF電場/位相誤差を $\pm 1.0\%/ \pm 1.0^\circ$ 以内で与えた場合、 $\pm 2.0\%/ \pm 2.0^\circ$ 以内で与えた場合、 $\pm 3.0\%/ \pm 3.0^\circ$ 以内で与えた場合のシミュレーション結果をそれぞれ表3.4～表3.6に示す。また、表3.7に比較をまとめる。横方向rmsエミッタンス増加はRF電場/位相誤差が $\pm 1.0\%/ \pm 1.0^\circ$ 及び $\pm 2.0\%/ \pm 2.0^\circ$ で平均1%程度、 $\pm 3.0\%/ \pm 3.0^\circ$ で平均2%程度であるのに対し、縦方向rmsエミッタンス増加は $\pm 1.0\%/ \pm 1.0^\circ$ で平均1%程度、 $\pm 2.0\%/ \pm 2.0^\circ$ で平均2%程度、 $\pm 3.0\%/ \pm 3.0^\circ$ で平均12%程度となり、誤差が大きくなるほど縦方向rmsエミッタンスが顕著に増加する結果となった。出力バンチ中心エネルギー変位(1σ)も $\pm 1.0\%/ \pm 1.0^\circ$ 以内の場合で 0.8MeV 、 $\pm 2.0\%/ \pm 2.0^\circ$ 以内の場合で 1.9MeV 、 $\pm 3.0\%/ \pm 3.0^\circ$ 以内で 3.3MeV となり、同様に誤差が増えると急激に悪化した。出力バンチrmsエネルギー幅についても $\pm 1.0\%/ \pm 1.0^\circ$ で $0.45\sim 0.56\text{MeV}$ 、 $\pm 2.0\%/ \pm 2.0^\circ$ で $0.44\sim 0.59\text{MeV}$ 、 $\pm 3.0\%/ \pm 3.0^\circ$ で $0.40\sim 0.77\text{MeV}$ となり、誤差が大きくなるに従って変位幅が大きくなった。図3.6に示す各ケースの縦方向位相空間分布とrmsエミッタンス例では、誤差の増加によりバンチ周辺の粒子がひげ上になって増加し、ビームの質が悪化するのが見られる。蓄積リングからは $\Delta E/E$ が0.2%以内すなわち、 ΔE が $\pm 3\text{MeV}$ と要求されており、ビームのエネルギー変位幅を 3σ までとすると、RF電場/位相誤差としては $\pm 1.0\%/ \pm 1.0^\circ$ 以内とする必要があると考える。

表 3.1 シミュレーション結果(RF 電場誤差 $\pm 1.0\%$)

ケース No.	横方向 rms エミッタンス [$\pi\text{cm}\cdot\text{mrad}$]	縦方向 rms エミッタンス [$\pi\text{MeV}\cdot\text{deg}$]	出力バンチ中心エネルギー [MeV]	出力バンチ rms エネルギー幅 [MeV]
#1	0.0405	0.422	1499.5	0.514
#2	0.0403	0.422	1499.4	0.499
#3	0.0404	0.423	1499.3	0.511
#4	0.0404	0.423	1501.0	0.495
#5	0.0402	0.426	1501.1	0.505
#6	0.0403	0.424	1499.5	0.503
#7	0.0403	0.424	1499.9	0.521
#8	0.0405	0.422	1501.0	0.510
#9	0.0404	0.422	1500.3	0.500
#10	0.0404	0.420	1500.1	0.501
#11	0.0405	0.422	1500.9	0.504
#12	0.0403	0.426	1499.4	0.502
#13	0.0404	0.424	1499.4	0.509
#14	0.0404	0.425	1500.0	0.506
#15	0.0404	0.423	1500.4	0.504
#16	0.0404	0.424	1500.3	0.501
#17	0.0402	0.425	1498.5	0.494
#18	0.0403	0.423	1500.7	0.495
#19	0.0405	0.424	1500.3	0.519
#20	0.0404	0.424	1500.0	0.510
平均	0.0404	0.423	1500.1	0.505
1σ	0.00009	0.0013	0.68	0.0073
誤差無	0.0404	0.425	1500.0	0.504

横方向の rms エミッタンスは X 方向と Y 方向 rms エミッタンスの二乗平均とした。

表 3.2 シミュレーション結果(RF 位相誤差 $\pm 1.0^\circ$)

ケース No.	横方向 rms エミッタンス [$\pi\text{cm}\cdot\text{mrad}$]	縦方向 rms エミッタンス [$\pi\text{MeV}\cdot\text{deg}$]	出力バンチ中心エネルギー [MeV]	出力バンチ rms エネルギー幅 [MeV]
#1	0.0404	0.424	1500.5	0.507
#2	0.0403	0.428	1499.7	0.459
#3	0.0403	0.426	1500.0	0.492
#4	0.0404	0.424	1499.5	0.497
#5	0.0404	0.425	1499.7	0.492
#6	0.0404	0.422	1501.0	0.487
#7	0.0402	0.424	1501.0	0.537
#8	0.0403	0.424	1500.3	0.511
#9	0.0404	0.423	1500.5	0.477
#10	0.0403	0.425	1499.1	0.520
#11	0.0403	0.424	1498.7	0.482
#12	0.0405	0.422	1500.3	0.509
#13	0.0403	0.426	1499.8	0.484
#14	0.0403	0.425	1499.1	0.520
#15	0.0402	0.426	1499.4	0.499
#16	0.0405	0.429	1500.2	0.534
#17	0.0403	0.425	1500.1	0.534
#18	0.0403	0.425	1500.2	0.509
#19	0.0403	0.425	1500.5	0.478
#20	0.0404	0.423	1500.8	0.524
平均	0.0403	0.425	1500.0	0.503
1σ	0.00008	0.0017	0.62	0.0210
誤差 無	0.0404	0.425	1500.0	0.504

横方向の rms エミッタンスは X 方向と Y 方向 rms エミッタンスの二乗平均とした。

表 3.3 RF 電場誤差 $\pm 1.0\%$ を与えた場合と RF 位相誤差 $\pm 1.0^\circ$ を与えた場合の比較

	電場誤差 $\pm 1.0\%$	位相誤差 $\pm 1.0^\circ$
横方向 rms エミッタンス増加 (無誤差:1.0%)	0.5%~1.3% 平均 1.0%	0.5%~1.3% 平均 0.8%
縦方向 rms エミッタンス増加 (無誤差:1.0%)	0.0%~1.2% 平均 0.5%	0.2%~1.9% 平均 1.0%
出力バンチ中心エネルギー (無誤差:1500MeV)	1498.5~1501.1MeV $1\sigma=0.68\text{MeV}$	1498.7~1501.0MeV $1\sigma=0.62\text{MeV}$
出力バンチ rms エネルギー幅 (無誤差:0.50MeV)	0.49~0.52MeV 平均 0.51MeV	0.46~0.54MeV 平均 0.50MeV

表 3.4 シミュレーション結果(RF 電場/位相誤差 $\pm 1.0\%/ \pm 1.0^\circ$)

ケース No.	横方向 rms エミッタンス [$\pi\text{cm}\cdot\text{mrad}$]	縦方向 rms エミッタンス [$\pi\text{MeV}\cdot\text{deg}$]	出力バンチ中心 エネルギー [MeV]	出力バンチ rms エネルギー幅 [MeV]
#1	0.0405	0.421	1500.9	0.490
#2	0.0404	0.423	1500.3	0.459
#3	0.0404	0.422	1500.0	0.520
#4	0.0403	0.427	1500.4	0.479
#5	0.0403	0.425	1500.2	0.514
#6	0.0403	0.423	1500.4	0.498
#7	0.0404	0.422	1499.1	0.504
#8	0.0404	0.424	1499.5	0.485
#9	0.0403	0.428	1498.9	0.468
#10	0.0403	0.423	1500.4	0.498
#11	0.0402	0.426	1501.2	0.528
#12	0.0404	0.424	1501.3	0.507
#13	0.0405	0.426	1499.8	0.464
#14	0.0406	0.421	1500.2	0.449
#15	0.0404	0.424	1498.3	0.466
#16	0.0405	0.423	1501.1	0.486
#17	0.0403	0.426	1499.2	0.527
#18	0.0405	0.426	1499.2	0.555
#19	0.0403	0.425	1500.0	0.482
#20	0.0404	0.427	1499.8	0.554
平均	0.0404	0.424	1500.0	0.497
1σ	0.00011	0.0019	0.78	0.0291
誤差 無	0.0404	0.425	1500.0	0.504

横方向の rms エミッタンスは X 方向及び Y 方向 rms エミッタンスの二乗平均とした。

表 3.5 シミュレーション結果(RF 電場/位相誤差 $\pm 2.0\%/ \pm 2.0^\circ$)

ケース No.	横方向 rms エミッタンス [$\pi\text{cm}\cdot\text{mrad}$]	縦方向 rms エミッタンス [$\pi\text{MeV}\cdot\text{deg}$]	出力バンチ中心 エネルギー [MeV]	出力バンチ rms エネルギー幅 [MeV]
#1	0.0408	0.429	1500.1	0.592
#2	0.0406	0.426	1500.1	0.524
#3	0.0404	0.433	1497.3	0.435
#4	0.0406	0.428	1500.2	0.564
#5	0.0403	0.427	1500.0	0.467
#6	0.0403	0.436	1497.2	0.503
#7	0.0403	0.435	1500.0	0.512
#8	0.0404	0.433	1499.4	0.515
#9	0.0404	0.431	1498.8	0.569
#10	0.0404	0.435	1502.6	0.535
#11	0.0408	0.419	1501.1	0.494
#12	0.0402	0.426	1500.5	0.497
#13	0.0405	0.430	1498.0	0.487
#14	0.0403	0.426	1500.9	0.511
#15	0.0402	0.434	1501.6	0.588
#16	0.0402	0.438	1497.5	0.529
#17	0.0405	0.459	1499.6	0.463
#18	0.0406	0.425	1500.7	0.530
#19	0.0404	0.430	1505.4	0.450
#20	0.0401	0.430	1498.3	0.548
平均	0.0404	0.431	1500.0	0.516
1 σ	0.00019	0.0078	1.89	0.0424
誤差 無	0.0404	0.425	1500.0	0.504

横方向の rms エミッタンスは X 方向及び Y 方向 rms エミッタンスの二乗平均とした。

表 3.6 シミュレーション結果(RF 電場/位相誤差 $\pm 3.0\%/ \pm 3.0^\circ$)

ケース No.	横方向 rms エミッタンス [$\pi\text{cm}\cdot\text{mrad}$]	縦方向 rms エミッタンス [$\pi\text{MeV}\cdot\text{deg}$]	出力バンチ中心 エネルギー [MeV]	出力バンチ rms エネルギー幅 [MeV]
#1	0.0407	0.454	1498.0	0.707
#2	0.0404	0.441	1501.3	0.571
#3	0.0409	0.442	1496.2	0.465
#4	0.0407	0.505	1499.5	0.425
#5	0.0403	0.458	1494.5	0.400
#6	0.0406	0.427	1499.0	0.509
#7	0.0403	0.462	1498.8	0.561
#8	0.0403	0.444	1496.7	0.498
#9	0.0405	0.449	1503.4	0.512
#10	0.0404	0.440	1502.6	0.467
#11	0.0410	0.487	1501.8	0.505
#12	0.0405	0.484	1493.8	0.677
#13	0.0405	0.486	1493.1	0.769
#14	0.0415	0.468	1502.8	0.509
#15	0.0404	0.429	1502.7	0.493
#16	0.0413	0.570	1503.6	0.762
#17	0.0401	0.431	1498.3	0.556
#18	0.0407	0.487	1497.8	0.516
#19	0.0417	0.528	1501.4	0.709
#20	0.0402	0.498	1501.3	0.563
平均	0.0407	0.470	1499.3	0.559
1 σ	0.00043	0.0358	3.18	0.1059
誤差無	0.0404	0.425	1500.0	0.504

横方向の rms エミッタンスは X 方向及び Y 方向 rms エミッタンスの二乗平均とした。

表 3.7 RF 電場/位相誤差 $\pm 1.0\%/ \pm 1.0^\circ$ 、 $\pm 2.0\%/ \pm 2.0^\circ$ 、 $\pm 3.0\%/ \pm 3.0^\circ$ を与えた場合の比較

RF 電場/位相誤差	$\pm 1.0\%/ \pm 1.0^\circ$	$\pm 2.0\%/ \pm 2.0^\circ$	$\pm 3.0\%/ \pm 3.0^\circ$
横方向 rms エミッタンス増加 (無誤差:1.0%)	0.5~1.5% 平均 1.0%	0.3~2.0% 平均 1.0%	0.3~4.3% 平均 1.5%
縦方向 rms エミッタンス増加 (無誤差:1.0%)	0.0~1.7% 平均 0.7%	0.0~9.0% 平均 2.4%	1.4~35.4% 平均 11.6%
出力バンチ中心エネルギー (無誤差:1500MeV)	1498.3~1501.3MeV 1 σ =0.8MeV	1497.2~1505.4MeV 1 σ =1.9MeV	1493.1~1503.6MeV 1 σ =3.2MeV
出力バンチ rms エネルギー幅 (無誤差:0.50MeV)	0.45~0.56MeV 平均 0.50MeV	0.44~0.59MeV 平均 0.52MeV	0.40~0.77MeV 平均 0.56MeV

3.2.2 四極電磁石水平/垂直設置誤差

四極電磁石水平/垂直方向設置誤差を $\pm 0.10\text{mm}$ 以内で与えた場合、 $\pm 0.20\text{mm}$ 以内で与えた場合、 $\pm 0.30\text{mm}$ 以内で与えた場合のシミュレーション結果をそれぞれ表 3.8～表 3.10 に示す。また、表 3.11 に比較を示す。なお、表中の fill factor の定義は次のとおりであり、ビーム・パイプの断面に占めるビームの通過する領域がどれだけあるかを意味するものである。

$$\text{fill factor} = (\text{ビーム中心の軸上からのずれ} + 3 \times \text{rms ビーム・サイズ}) / \text{ボア半径}(5\text{cm})$$

横方向 rms エミッタンス増加は、誤差を $\pm 0.10\text{mm}$ 以内で与えた場合、平均 1%程度、 $\pm 0.20\text{mm}$ 以内で与えた場合、平均 2%程度、 $\pm 0.30\text{mm}$ 以内で与えた場合、平均 4%程度となった。バンチ中心最大変位は誤差を $\pm 0.10\text{mm}$ 以内で与えた場合、平均 0.5cm 程度、 $\pm 0.20\text{mm}$ 以内で与えた場合、平均 0.8cm 程度、 $\pm 0.30\text{mm}$ 以内で与えた場合、平均 1.4cm 程度となり、誤差が大きくなるに従い変位幅が大きくなった。Fill factor も同様な傾向が見られ、誤差を $\pm 0.10\text{mm}$ 以内で与えた場合、平均 0.28 程度、 $\pm 0.20\text{mm}$ 以内で与えた場合、平均 0.34 程度、 $\pm 0.30\text{mm}$ 以内で与えた場合、平均 0.45 程度となった。

縦方向 rms エミッタンス増加は $\pm 0.10\text{mm}$ 以内で与えた場合、平均 2%程度、 $\pm 0.20\text{mm}$ 以内で与えた場合、平均 4%程度、 $\pm 0.30\text{mm}$ 以内で与えた場合、平均 9%程度となった。出力ビーム中心エネルギーはいずれの場合もほとんど影響がなかった。出力バンチ rms エネルギー幅については誤差を $\pm 0.10\text{mm}$ 、 $\pm 0.20\text{mm}$ 以内で与えた場合はほとんど影響が無く、 $\pm 0.30\text{mm}$ で与えた場合に 0.50～0.58MeV で変化した。

ビーム中心の軸上からのずれ及び fill factor の典型例を図 3.7 に示す。四極電磁石水平/垂直方向設置誤差によってビームは中心軸からずれ、そのずれは振動的に変化し、誤差が増えるに従ってずれの振幅が大きくなるのが見られた。fill factor も同様なふるまいとなった。

ビームのずれは蓄積リングへの入射に影響を与えるので、水平/垂直設置誤差はできるだけ小さくしなければならない。既存の加速器では $\pm 0.1\text{mm}$ 程度を仕様として採用しており⁸⁾、本加速器でも同等の $\pm 0.10\text{mm}$ を採用する必要があると考える。

表 3.8 シミュレーション結果(四極電磁石水平/垂直設置誤差±0.10mm)

ケース No.	横方向 rms エミッタンス [$\pi\text{cm}\cdot\text{mrad}$]	バンチ中心 最大変位 [cm]	Fill factor	縦方向 rms エミッタンス [$\pi\text{MeV}\cdot\text{deg}$]	出力バンチ中心エネルギー [MeV]	出力バンチ rms エネルギー幅 [MeV]
#1	0.0404	0.564	0.293	0.432	1500.0	0.506
#2	0.0404	0.528	0.276	0.430	1500.0	0.507
#3	0.0402	0.378	0.253	0.431	1500.0	0.510
#4	0.0405	0.449	0.267	0.428	1500.0	0.508
#5	0.0405	0.581	0.296	0.426	1500.0	0.507
#6	0.0405	0.479	0.281	0.428	1500.0	0.506
#7	0.0407	0.581	0.292	0.425	1500.0	0.505
#8	0.0404	0.469	0.269	0.429	1500.0	0.507
#9	0.0404	0.597	0.284	0.426	1500.0	0.503
#10	0.0403	0.427	0.270	0.431	1500.0	0.509
#11	0.0404	0.604	0.299	0.428	1500.0	0.504
#12	0.0406	0.449	0.256	0.426	1500.0	0.505
#13	0.0405	0.645	0.313	0.427	1500.0	0.505
#14	0.0405	0.485	0.277	0.426	1500.0	0.504
#15	0.0403	0.612	0.296	0.428	1500.0	0.505
#16	0.0404	0.389	0.252	0.427	1500.0	0.505
#17	0.0407	0.659	0.316	0.424	1500.0	0.503
#18	0.0405	0.362	0.255	0.425	1500.0	0.503
#19	0.0404	0.516	0.281	0.432	1500.0	0.506
#20	0.0404	0.378	0.240	0.426	1500.0	0.506
平均	0.0404	0.508	0.278	0.428	1500.0	0.506
1 σ	0.00012	0.0921	0.0204	0.0023	0.00	0.0019
誤差 無	0.0404	0.002	0.218	0.425	1500.0	0.504

横方向の rms エミッタンスは X 方向及び Y 方向 rms エミッタンスの二乗平均とした。

表 3.9 シミュレーション結果(四極電磁石水平/垂直設置誤差±0.20mm)

ケース No.	横方向 rms エミッタンス [$\pi\text{cm}\cdot\text{mrad}$]	バンチ中心 最大変位 [cm]	Fill factor	縦方向 rms エミッタンス [$\pi\text{MeV}\cdot\text{deg}$]	出力バンチ中心エネルギー [MeV]	出力バンチ rms エネルギー幅 [MeV]
#1	0.0407	1.046	0.412	0.441	1499.9	0.517
#2	0.0409	0.635	0.314	0.431	1500.0	0.506
#3	0.0406	0.470	0.291	0.431	1500.0	0.507
#4	0.0410	1.129	0.395	0.434	1499.9	0.509
#5	0.0409	0.467	0.272	0.437	1500.0	0.504
#6	0.0406	0.944	0.357	0.457	1500.0	0.519
#7	0.0409	0.467	0.272	0.437	1500.0	0.504
#8	0.0413	1.167	0.408	0.435	1500.0	0.511
#9	0.0407	0.628	0.298	0.435	1500.0	0.505
#10	0.0406	0.845	0.343	0.450	1499.9	0.508
#11	0.0407	0.886	0.349	0.446	1499.9	0.514
#12	0.0410	0.587	0.288	0.433	1500.0	0.508
#13	0.0409	1.213	0.416	0.450	1500.0	0.513
#14	0.0408	1.059	0.384	0.430	1500.0	0.504
#15	0.0408	0.793	0.327	0.437	1500.0	0.505
#16	0.0408	0.809	0.330	0.429	1500.0	0.504
#17	0.0406	0.922	0.346	0.435	1499.9	0.506
#18	0.0408	0.918	0.375	0.437	1500.0	0.513
#19	0.0406	0.851	0.340	0.432	1499.9	0.507
#20	0.0407	0.895	0.347	0.431	1499.9	0.502
平均	0.0408	0.837	0.343	0.437	1500.0	0.508
1 σ	0.00017	0.2256	0.0443	0.0076	0.05	0.0046
誤差 無	0.0404	0.002	0.218	0.425	1500.0	0.504

横方向の rms エミッタンスは X 方向及び Y 方向 rms エミッタンスの二乗平均とした。

表 3.10 シミュレーション結果(四極電磁石水平/垂直設置誤差±0.30mm)

ケース No.	横方向 rms エミッタンス [π cm \cdot mrad]	バンチ中心最大変位 [cm]	Fill factor	縦方向 rms エミッタンス [π MeV \cdot deg]	出力バンチ中心エネルギー [MeV]	出力バンチ rms エネルギー幅 [MeV]
#1	0.0419	1.742	0.521	0.451	1500.1	0.515
#2	0.0421	1.678	0.505	0.452	1500.0	0.511
#3	0.0423	1.908	0.572	0.462	1499.9	0.521
#4	0.0421	1.621	0.511	0.464	1500.0	0.521
#5	0.0411	1.006	0.379	0.455	1499.9	0.517
#6	0.0416	0.983	0.358	0.450	1499.9	0.515
#7	0.0426	2.657	0.706	0.474	1500.0	0.543
#8	0.0416	1.505	0.470	0.440	1500.0	0.508
#9	0.0407	1.187	0.415	0.464	1500.0	0.521
#10	0.0417	1.352	0.453	0.455	1500.0	0.521
#11	0.0407	1.100	0.398	0.467	1499.9	0.520
#12	0.0412	1.342	0.435	0.475	1500.1	0.534
#13	0.0411	0.959	0.376	0.457	1499.9	0.522
#14	0.0414	1.251	0.418	0.444	1499.9	0.517
#15	0.0410	0.859	0.344	0.441	1499.9	0.505
#16	0.0411	0.705	0.338	0.442	1500.0	0.509
#17	0.0415	1.240	0.428	0.477	1500.0	0.532
#18	0.0425	2.095	0.598	0.506	1500.0	0.580
#19	0.0415	1.122	0.415	0.443	1500.0	0.509
#20	0.0408	1.221	0.413	0.451	1500.0	0.518
平均	0.0415	1.377	0.453	0.458	1500.0	0.522
1 σ	0.00057	0.4562	0.0910	0.0156	0.06	0.0161
誤差無	0.0404	0.002	0.218	0.425	1500.0	0.504

横方向の rms エミッタンスは X 方向及び Y 方向 rms エミッタンスの二乗平均とした。

表 3.11 四極電磁石水平/垂直設置誤差±0.10mm、±0.20mm、±0.30mm を与えた場合の比較

四極電磁石水平/垂直設置誤差	±0.10mm	±0.20mm	±0.30mm
横方向 rms エミッタンス増加 (無誤差:1.0%)	0.5~1.8% 平均 1.0%	1.5~3.3% 平均 2.0%	1.8~6.5% 平均 3.8%
バンチ中心最大変位[cm] (無誤差:0.00cm)	0.36~0.66cm 平均 0.51cm	0.47~1.21cm 平均 0.84cm	0.71~2.66cm 平均 1.38cm
Fill factor (無誤差:0.22)	0.24~0.32 平均 0.28	0.27~0.42 平均 0.34	0.34~0.71 平均 0.45
縦方向 rms エミッタンス増加 (無誤差:1.0%)	0.7~2.6% 平均 1.7%	1.9~8.6% 平均 3.8%	4.5~20.2% 平均 8.8%
出力バンチ中心エネルギー (無誤差:1500MeV)	1500.0MeV 1 σ =0.0MeV	1499.9~1500.0MeV 1 σ =0.1MeV	1499.9~1500.1MeV 1 σ =0.1MeV
出力バンチ rms エネルギー幅 (無誤差:0.50MeV)	0.50~0.51MeV 平均 0.51MeV	0.50~0.52MeV 平均 0.51MeV	0.50~0.58MeV 平均 0.52MeV

3.2.3 四極電磁石ロール誤差

四極電磁石ロール誤差を $\pm 0.10^\circ$ 以内で与えた場合、 $\pm 0.15^\circ$ 以内で与えた場合、 $\pm 0.25^\circ$ 以内で与えた場合のシミュレーション結果を表 3.12～表 3.14 に示す。また、表 3.15 に比較をまとめる。横方向 rms エミッタンス増加は誤差が $\pm 0.10^\circ$ 以内の場合、平均 2%程度、 $\pm 0.15^\circ$ 以内の場合、平均 4%程度、 $\pm 0.25^\circ$ 以内の場合、平均 8%程度となり、誤差が大きくなるに従って顕著に増加する傾向となった。バンチのビーム軸からのずれはいずれの誤差の場合も影響は無い結果となった。また、縦方向 rms エミッタンス、出力バンチ中心エネルギー、出力バンチエネルギー幅についても影響が無い結果となった。図 3.8 に示す横方向(X)出力ビーム位相空間分布と横方向規格化 rms エミッタンスの典型例では、ロール誤差 $\pm 0.10^\circ$ 及び $\pm 0.15^\circ$ 以内のビーム形状は誤差が無い場合の形状をほぼ保っているが、 $\pm 0.25^\circ$ 以内になるとビームの縁の粒子が多くなった。ロール誤差としては $\pm 0.15^\circ$ 以内を採用する必要があると考える。

表 3.12 シミュレーション結果(四極電磁石ロール誤差 $\pm 0.10^\circ$)

ケース No.	横方向 rms エミッタンス [$\pi\text{cm}\cdot\text{mrad}$]	出力バンチ中心位置 (X) [cm]	出力バンチ中心位置 (Y) [cm]	縦方向 rms エミッタンス [$\pi\text{MeV}\cdot\text{deg}$]	出力バンチ中心エネルギー [MeV]	出力バンチ rms エネルギー幅 [MeV]
#1	0.0407	0.000	0.002	0.424	1500.0	0.502
#2	0.0407	0.001	0.000	0.425	1500.0	0.505
#3	0.0408	-0.001	-0.001	0.425	1500.0	0.505
#4	0.0406	0.000	0.001	0.427	1500.0	0.506
#5	0.0412	-0.001	0.000	0.422	1500.0	0.504
#6	0.0406	0.000	-0.001	0.424	1500.0	0.504
#7	0.0408	-0.002	0.001	0.424	1500.0	0.502
#8	0.0410	0.001	0.001	0.424	1500.0	0.503
#9	0.0406	-0.001	-0.001	0.425	1500.0	0.507
#10	0.0410	-0.001	0.000	0.424	1500.0	0.505
#11	0.0409	0.000	-0.001	0.422	1500.0	0.504
#12	0.0408	0.003	0.000	0.423	1500.0	0.505
#13	0.0414	0.001	0.001	0.419	1500.0	0.503
#14	0.0409	0.000	-0.001	0.422	1500.0	0.503
#15	0.0405	0.000	-0.001	0.423	1500.0	0.506
#16	0.0408	0.001	0.000	0.425	1500.0	0.502
#17	0.0408	0.000	0.000	0.423	1500.0	0.503
#18	0.0408	-0.001	0.000	0.422	1500.0	0.502
#19	0.0408	0.002	-0.002	0.424	1500.0	0.504
#20	0.0408	0.001	0.001	0.424	1500.0	0.502
平均	0.0408	0.000	0.000	0.423	1500.0	0.504
1 σ	0.00021	0.0011	0.0008	0.0016	0.00	0.0015
誤差無	0.0404	-0.002	0.000	0.425	1500.0	0.504

横方向の rms エミッタンスは X 方向及び Y 方向 rms エミッタンスの二乗平均とした。

表 3.13 シミュレーション結果(四極電磁石ロール誤差 $\pm 0.15^\circ$)

ケース No.	横方向 rms エミッタンス [$\pi\text{cm}\cdot\text{mrad}$]	出力バンチ 中心位置 (X) [cm]	出力バンチ 中心位置 (Y) [cm]	縦方向 rms エミッタンス [$\pi\text{MeV}\cdot\text{deg}$]	出力バンチ 中心エネルギー [MeV]	出力バンチ rms エネルギー幅 [MeV]
#1	0.0415	0.001	0.001	0.423	1500.0	0.502
#2	0.0411	0.001	0.001	0.425	1500.0	0.501
#3	0.0407	0.000	0.000	0.424	1500.0	0.505
#4	0.0411	0.003	-0.002	0.426	1500.0	0.505
#5	0.0409	0.001	-0.001	0.424	1500.0	0.501
#6	0.0403	0.001	0.000	0.425	1500.0	0.505
#7	0.0415	-0.001	0.002	0.422	1500.0	0.501
#8	0.0412	0.000	0.001	0.424	1500.0	0.504
#9	0.0416	-0.001	0.001	0.423	1500.0	0.504
#10	0.0420	-0.002	0.000	0.423	1500.0	0.502
#11	0.0424	0.001	0.000	0.420	1500.0	0.502
#12	0.0425	0.000	-0.001	0.425	1500.0	0.505
#13	0.0414	0.000	0.000	0.426	1500.0	0.501
#14	0.0414	-0.002	0.001	0.423	1500.0	0.505
#15	0.0408	0.000	0.000	0.424	1500.0	0.501
#16	0.0420	0.000	0.000	0.427	1500.0	0.505
#17	0.0421	-0.001	-0.001	0.422	1500.0	0.503
#18	0.0417	0.000	0.000	0.423	1500.0	0.502
#19	0.0413	0.001	0.000	0.423	1500.0	0.502
#20	0.0416	-0.002	0.000	0.424	1500.0	0.505
平均	0.0415	0.000	0.000	0.424	1500.0	0.503
1 σ	0.00055	0.0011	0.0009	0.0015	0.00	0.0017
誤差 無	0.0404	-0.002	0.000	0.425	1500.0	0.504

横方向の rms エミッタンスは X 方向及び Y 方向 rms エミッタンスの二乗平均とした。

表 3.14 シミュレーション結果(四極電磁石ロール誤差 $\pm 0.25^\circ$)

ケース No.	横方向 rms エミッタンス [$\pi\text{cm}\cdot\text{mrad}$]	出力バンチ 中心位置 (X) [cm]	出力バンチ 中心位置 (Y) [cm]	縦方向 rms エミッタンス [$\pi\text{MeV}\cdot\text{deg}$]	出力バンチ 中心エネルギー [MeV]	出力バンチ rms エネルギー幅 [MeV]
#1	0.0430	0.001	0.001	0.423	1500.0	0.502
#2	0.0442	0.000	-0.001	0.424	1500.0	0.498
#3	0.0420	0.001	0.001	0.424	1500.0	0.502
#4	0.0431	0.001	0.000	0.424	1500.0	0.498
#5	0.0434	0.000	0.001	0.424	1500.0	0.504
#6	0.0450	0.000	-0.001	0.422	1500.0	0.499
#7	0.0447	-0.002	0.001	0.422	1500.0	0.506
#8	0.0445	0.000	-0.001	0.423	1500.0	0.503
#9	0.0429	-0.002	0.000	0.425	1500.0	0.500
#10	0.0425	-0.010	0.000	0.424	1500.0	0.503
#11	0.0429	0.001	0.001	0.423	1500.0	0.503
#12	0.0426	0.002	0.001	0.423	1500.0	0.504
#13	0.0413	-0.001	0.000	0.423	1500.0	0.503
#14	0.0460	0.000	0.000	0.420	1500.0	0.501
#15	0.0438	-0.001	0.000	0.425	1500.0	0.501
#16	0.0436	-0.001	-0.001	0.425	1500.0	0.499
#17	0.0423	0.000	-0.001	0.425	1500.0	0.504
#18	0.0434	0.000	0.000	0.426	1500.0	0.500
#19	0.0424	0.001	0.001	0.420	1500.0	0.500
#20	0.0416	-0.002	-0.001	0.422	1500.0	0.503
平均	0.0433	-0.001	0.000	0.423	1500.0	0.502
1σ	0.01151	0.0010	0.0008	0.0015	0.00	0.0022
誤差 無	0.0404	-0.002	0.000	0.425	1500.0	0.504

横方向の rms エミッタンスは X 方向及び Y 方向 rms エミッタンスの二乗平均とした。

表 3.15 四極電磁石ロール誤差 $\pm 0.10^\circ$ 、 $\pm 0.15^\circ$ 、 $\pm 0.25^\circ$ を与えた場合の比較

四極電磁石ロール誤差	$\pm 0.10^\circ$	$\pm 0.15^\circ$	$\pm 0.25^\circ$
横方向 rms エミッタンス増加 (無誤差:1.0%)	1.3~3.5% 平均 2.0%	0.8~6.3% 平均 3.8%	3.3~15.0% 平均 8.3%
出力バンチ中心位置 (無誤差:X, Y=0.00cm)	X, Y=0.00cm	X, Y=0.00cm	X=-0.01~0.00cm Y=0.00cm
縦方向 rms エミッタンス増加 (無誤差:1.0%)	0.0~1.4% 平均 0.5%	0.0~1.4% 平均 0.7%	0.0~1.2% 平均 0.5%
出力バンチ中心エネルギー (無誤差:1500MeV)	1500.0MeV $1\sigma=0.0\text{MeV}$	1500.0MeV $1\sigma=0.0\text{MeV}$	1500.0MeV $1\sigma=0.0\text{MeV}$
出力バンチ rms エネルギー幅 (無誤差:0.50MeV)	0.50~0.51MeV 平均 0.50MeV	0.50~0.51MeV 平均 0.50MeV	0.50~0.51MeV 平均 0.50MeV

3.2.4 RF 誤差及び四極電磁石誤差

前節までの検討を踏まえて、キャビティ内の RF 誤差及び四極電磁石設置誤差を次のように設定し、20 個のシミュレーションを行った。ただし、四極電磁石チルト誤差については理論的にはビームへの影響は小さいが、誤差が大きくなると水平/垂直設置誤差やロール誤差に影響が出てくるので、ここでは既存の加速器の仕様として採用されている $\pm 0.25^\circ$ 以内とした。

- ・ キャビティ内 RF 電場/位相誤差 $\pm 1.0\%/ \pm 1.0^\circ$ 以内
- ・ 四極電磁石水平/垂直設置誤差 $\pm 0.10\text{mm}$ 以内
- ・ 四極電磁石チルト/ロール誤差 $\pm 0.25^\circ/ \pm 0.15^\circ$ 以内

シミュレーション結果を表 3.16、3.17 に示す。また、シミュレーション例(出力ビームの位相空間分布)を図 3.9 に示す。横方向 rms エミッタンス増加は平均 4%程度、バンチ中心最大変位は平均 0.5cm 程度、fill factor は平均 0.28 程度、縦方向 rms エミッタンス増加は平均 2.4%程度、出力バンチ中心エネルギー変位(1σ)は 0.8MeV 程度、出力バンチ rms エネルギー幅は 0.45~0.57MeV 程度となり、RF 電場/位相誤差、四極電磁石水平/垂直設置誤差、四極電磁石ロール誤差をそれぞれ単体で与えた場合の影響を相加したものとほぼ同じ結果を得た。

表 3.16 RF 誤差と四極電磁石誤差を与えた場合のシミュレーション結果

ケース No.	横方向 rms エミッタンス [π cm \cdot mrad]	バンチ中心最大変位 [cm]	Fill factor	縦方向 rms エミッタンス [π MeV \cdot deg]	出力バンチ中心エネルギー [MeV]	出力バンチ rms エネルギー幅 [MeV]
#1	0.0412	0.299	0.239	0.426	1497.8	0.482
#2	0.0408	0.726	0.315	0.432	1500.5	0.491
#3	0.0419	0.746	0.312	0.431	1500.5	0.574
#4	0.0416	0.464	0.271	0.429	1500.6	0.448
#5	0.0408	0.726	0.315	0.432	1500.5	0.491
#6	0.0415	0.601	0.306	0.429	1500.1	0.516
#7	0.0413	0.437	0.268	0.430	1499.6	0.517
#8	0.0420	0.345	0.242	0.429	1499.2	0.529
#9	0.0411	0.342	0.240	0.429	1500.2	0.506
#10	0.0409	0.492	0.273	0.430	1500.1	0.553
#11	0.0419	0.608	0.298	0.433	1498.7	0.527
#12	0.0414	0.337	0.255	0.432	1500.6	0.503
#13	0.0428	0.245	0.240	0.434	1499.2	0.487
#14	0.0417	0.610	0.312	0.442	1499.6	0.554
#15	0.0417	0.710	0.313	0.437	1500.4	0.488
#16	0.0423	0.313	0.246	0.425	1500.1	0.536
#17	0.0420	0.839	0.341	0.437	1500.3	0.503
#18	0.0433	0.672	0.318	0.430	1498.8	0.513
#19	0.0417	0.441	0.246	0.428	1500.7	0.478
#20	0.0421	0.476	0.276	0.436	1499.2	0.535
平均	0.0417	0.521	0.281	0.431	1499.8	0.512
1 σ	0.00062	0.1734	0.0326	0.0041	0.77	0.0294
誤差無	0.0404	0.002	0.218	0.425	1500.0	0.504

横方向の rms エミッタンスは X 方向及び Y 方向 rms エミッタンスの二乗平均とした。

表 3.17 RF 誤差と四極電磁石誤差を個別に与えた場合と同時に与えた場合の比較

	①RF 電場/位相誤差 $\pm 1.0\%/ \pm 1.0^\circ$	②四極電磁石水平垂直設置誤差 ± 0.10 mm	③四極電磁石ロール誤差 $\pm 0.15^\circ$	①+②+③+四極電磁石フル誤差 $\pm 0.25^\circ$
横方向 rms エミッタンス増加 (無誤差:1.0%)	0.5~1.5% 平均 1.0%	0.5~1.8% 平均 1.0%	0.8~6.3% 平均 3.8%	2.0~8.3% 平均 4.3%
バンチ中心最大変位[cm] (無誤差:0.00cm)	—	0.36~0.66cm 平均 0.51cm	—	0.25~0.84cm 平均 0.52cm
Fill factor (無誤差:0.22)	—	0.24~0.32 平均 0.28	—	0.23~0.34 平均 0.28
縦方向 rms エミッタンス増加 (無誤差:1.0%)	0.0~1.7% 平均 0.7%	0.7~2.6% 平均 1.7%	0.0~1.4% 平均 0.7%	1.0~5.0% 平均 2.4%
出力バンチ中心エネルギー (無誤差:1500MeV)	1498.3~ 1501.3MeV 1 σ =0.8MeV	1500.0MeV 1 σ =0.0MeV	1500.0MeV 1 σ =0.0MeV	1497.8~1500.7 1 σ =0.8MeV
出力バンチ rms エネルギー幅 (無誤差:0.50MeV)	0.45~0.56MeV 平均 0.50MeV	0.50~0.51MeV 平均 0.51MeV	0.50~0.51MeV 平均 0.50MeV	0.45~0.57MeV 平均 0.51MeV

4. まとめと今後の課題

中性子科学研究用超伝導加速器に関して下記概念設計検討を行った。

- (1) RF 位相に対するバンチの位相スリップ に注目し、 β セクション分割とキャビティ・ジオメトリカル β_g の割り当て方法を導出した。
- (2) 加速器構成設計に必要なビーム・ダイナミクス・パラメータを得るために、5セル・キャビティを SUPERFISH 及び MAFIA で設計し、キャビティの構造（ジオメトリカル β_g ）を変数とするビーム・ダイナミクス・パラメータについての fitting 関数を求めた。
- (3) ラティス構成には、Thermal energy transfer によるエミッタンス・グロースを抑制するために Equipartitioned 条件を採用した。また、Structure resonance 等、他のエミッタンス・グロースの要因を抑制するように考慮した。
- (4) 加速器長及びビームの質を考慮し、 β セクション数 8 の加速器構成をメイン・オプションとした。
- (5) ビーム・ダイナミクス・シミュレーションではエミッタンス・グロースが 1%程度に抑えられ、加速器設計の有効性を確認した。
- (6) キャビティ内 RF 誤差及び四極電磁石誤差を与えてビーム・シミュレーションを行い、加速器性能を評価した。

今後の課題としては下記が挙げられる。

- (1) DTL からの入射ビームを受け入れる際にできるだけエミッタンス・グロースを抑えるように、超伝導加速器の入り口付近の構成を検討する。
- (2) 超伝導空洞のいくつかが正常でない場合でもできるだけビームの質を悪化させない等、ロバスト（頑健）性を有する加速器構成が設計可能かどうか検討する。
- (3) RF 周波数は加速器構成に影響を与える(付録 B 参照)。また、ビーム電流値に対して入射ビームのエミッタンスが適当でなければ、加速器の入り口付近でエミッタンスが急増する(付録 C 参照)。加速器の基本パラメータを前段加速器との整合性やビームの質を考慮して、必要があれば再検討する。

謝 辞

本報告書作成にあたり、陽子加速器研究室の小栗英知氏、伊藤崇氏、千代悦司氏、池上雅紀氏、陽子リング研究室の金正倫計氏、LANLのDr. R. A. Jamesonをはじめとする多数のご協力を頂き、これらの方々に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] M. Mizumoto et al., "A PROTON ACCELERATOR FOR NEUTRON SCIENCE PROJECT AT JAERI", Proceedings of The First Asian Particle Accelerator Conference (1998).
- [2] Y. Honda et al., "A CONCEPTUAL DESIGN OF SUPERCONDUCTING PROTON LINEAR ACCELERATOR FOR NEUTRON SCIENCE PROJECT", Proceedings of The First Asian Particle Accelerator Conference (1998).
- [3] K. Hasegawa et al., "BEAM DYNAMICS STUDY OF HIGH INTENSITY LINAC FOR THE NEUTRON SCIENCE PROJECT AT JAERI", Proceedings of the First Asian Particle Accelerator Conference(1998).
- [4] T. P. Wangler, "INTRODUCTION TO LINEAR ACCELERATORS", LA-UR-93-805 (1993).
- [5] J. Struckmeier et al., "ON THE STABILITY AND EMITTANCE GROWTH OF DIFFERENT PARTICLE PHASE-SPACE DISTRIBUTIONS IN A LONG MAGNETIC QUADRUPOLE CHANNEL", Particle Accelerators 1984 Vol. 15 (1984)
- [6] R. A. Jameson, AIP Conference Proceedings 279, 969 (1993).
- [7] A. J. Jason et al., "NEUTRALIZATION OF H⁻ BEAMS BY MAGNETIC STRIPPING", IEEE, Trans. NS-28, 1981.
- [8] Los Alamos National Laboratory APT Conceptual Design Report, LA-UR-97-1329, 1997.

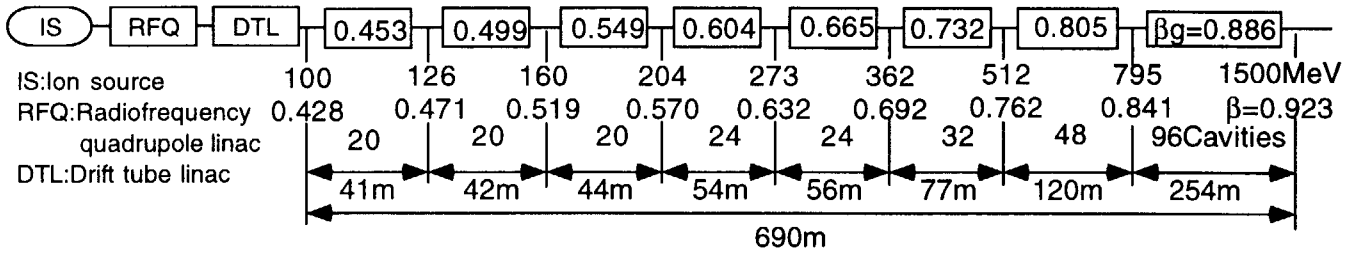


図 1.1 加速器構成概略図

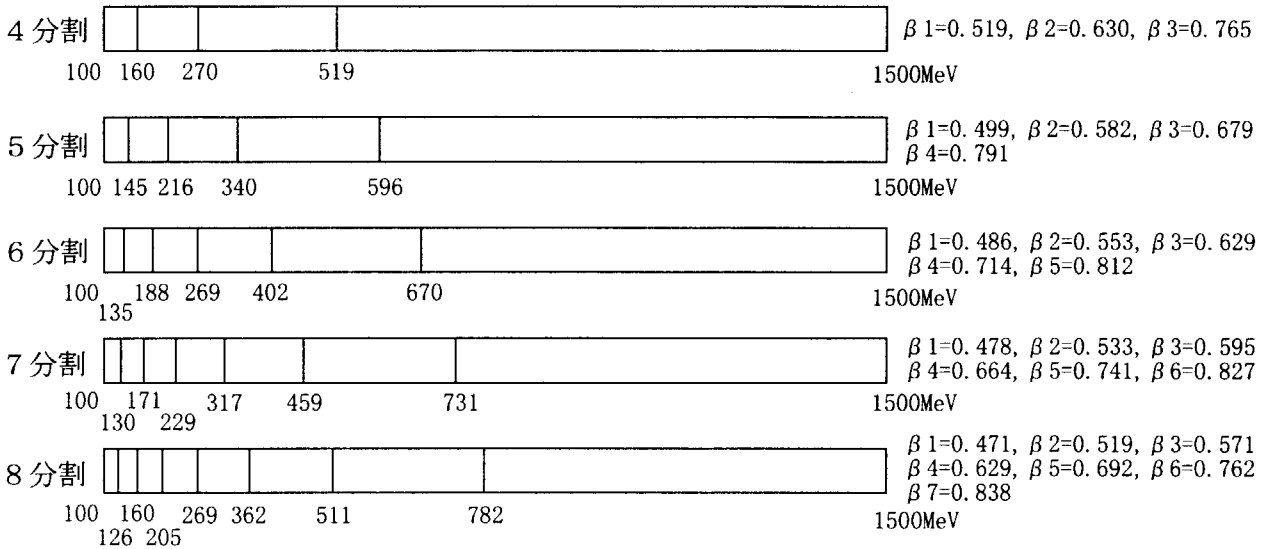


図 2.1 β セクション分割例

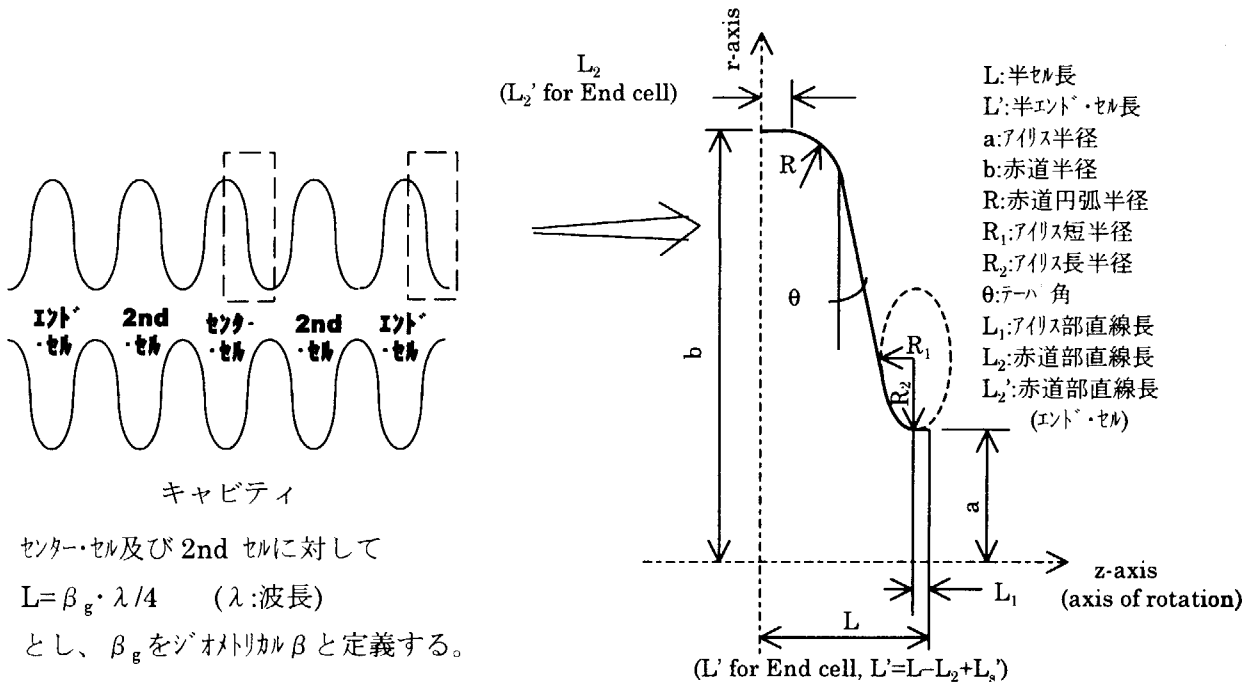


図 2.2 キャビティ形状パラメータ

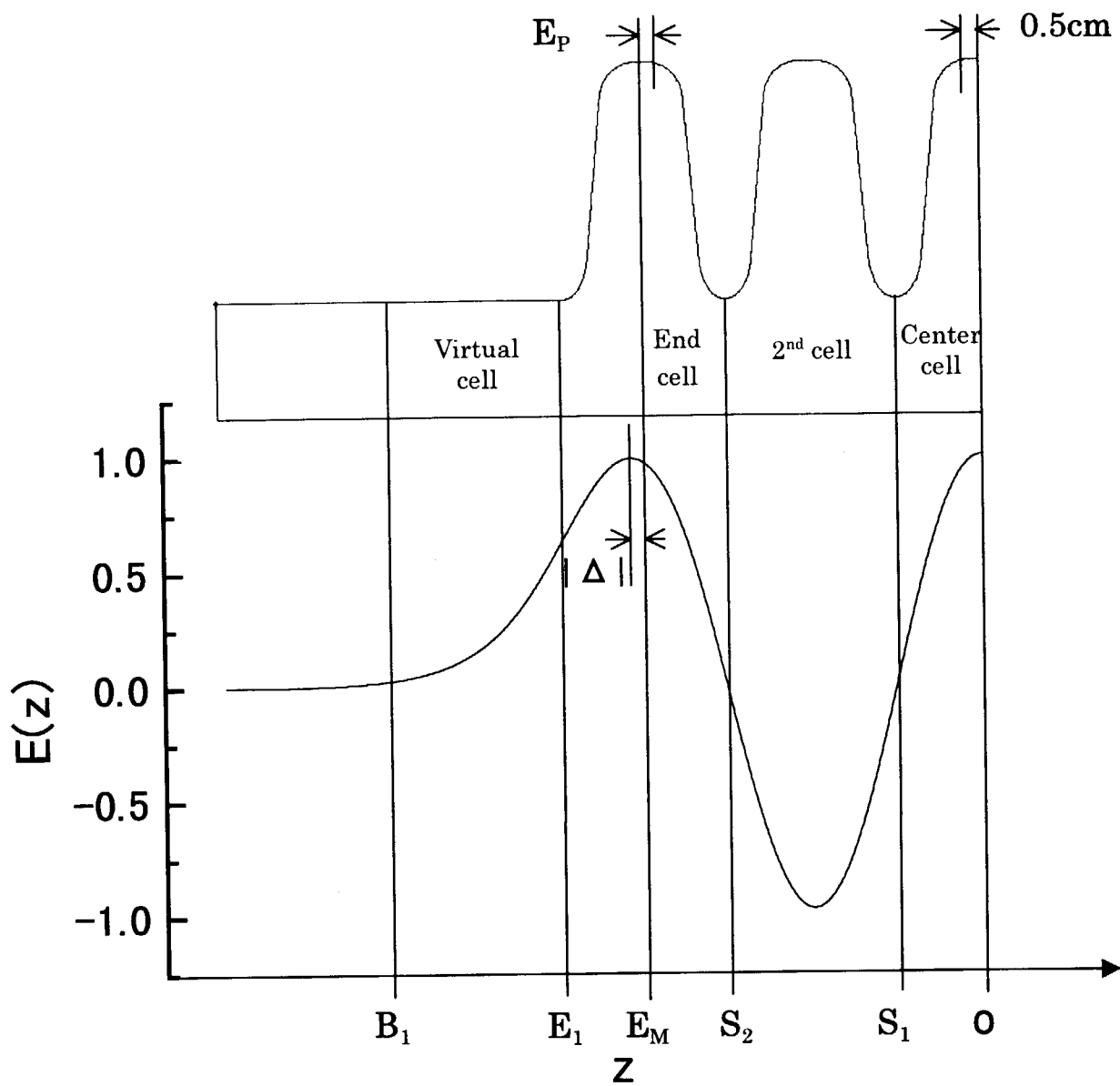


図 2.3 キャビティのジオメトリ

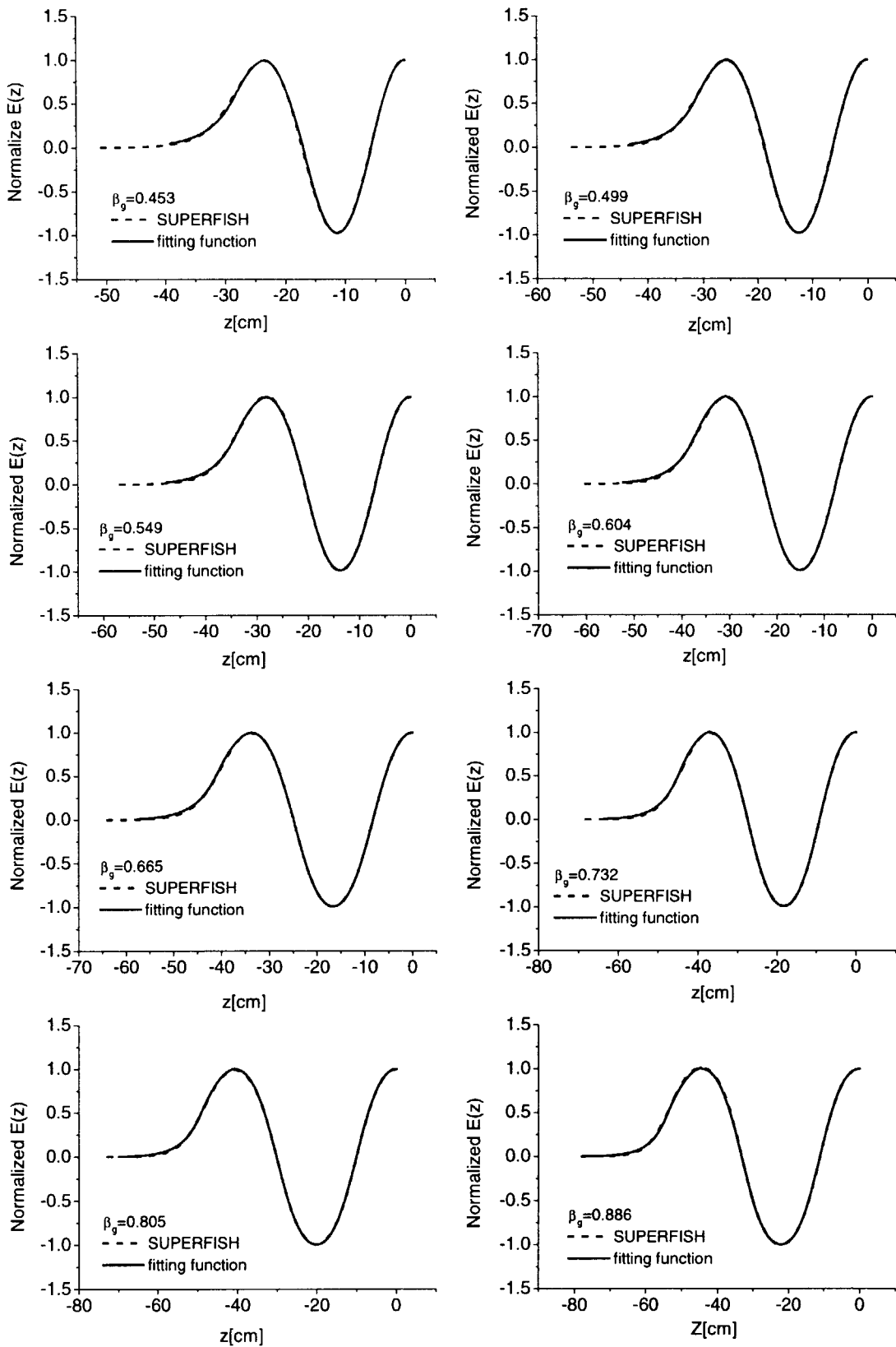


図 2.4 SUPERFISH 計算値と fitting 関数 (電場)

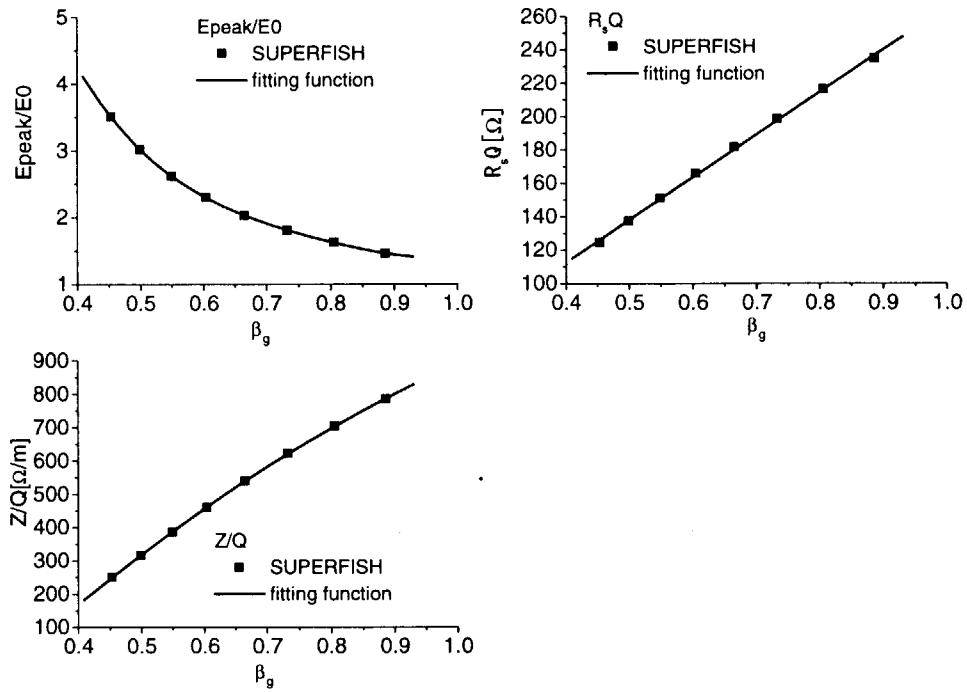


図 2.5 SUPERFISH 計算値と fitting 関数(E_{peak}/E_0 , $R_s Q$, Z/Q)

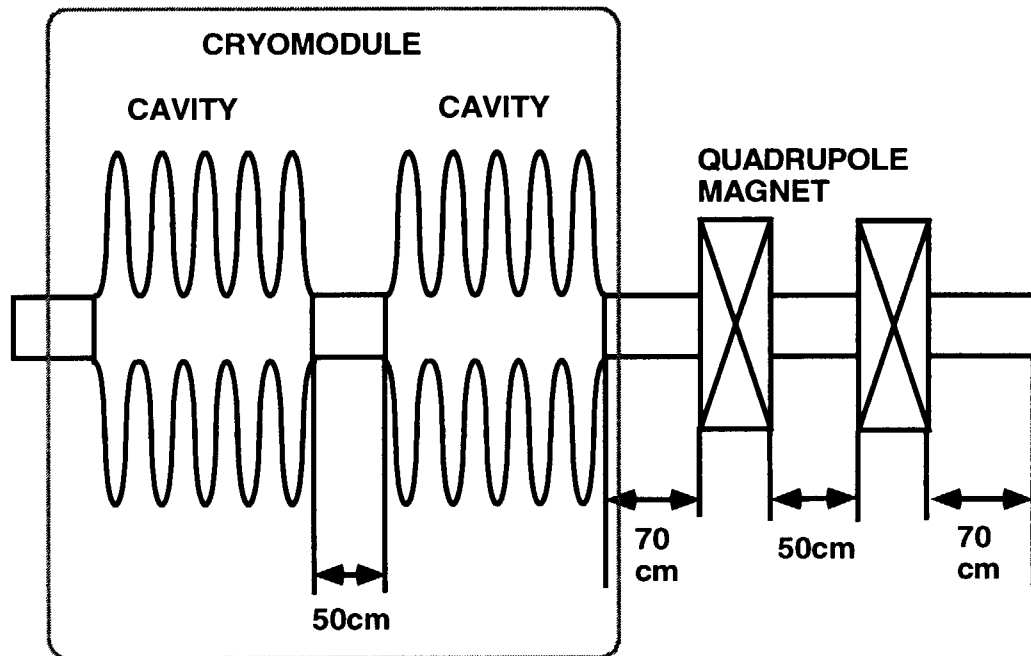
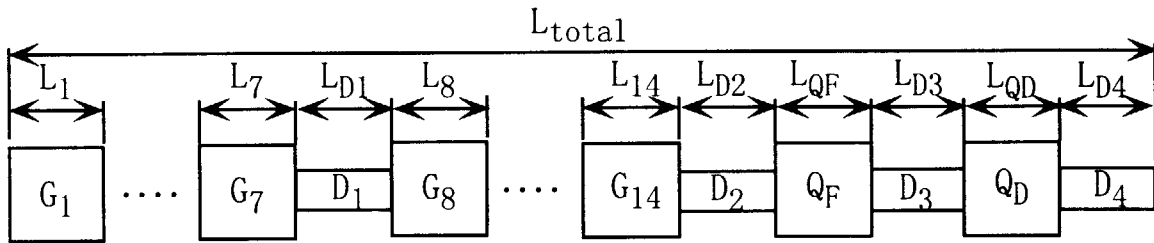


図 2.6 ラティス構成



$G_1 \cdots G_{14}$:セル, $D_1 \cdots D_4$:ドリフト, Q_F, Q_D :四極電磁石, L_{total} :1収束間距離,
 $L_1 \cdots L_{14}$:セル長, $L_{D1} \cdots L_{D4}$:ドリフト長, L_{QF}, L_{QD} :四極電磁石長

図 2.7 ラティス構成 (トランスファー・マトリックス表現、7セル・キャビティの例)

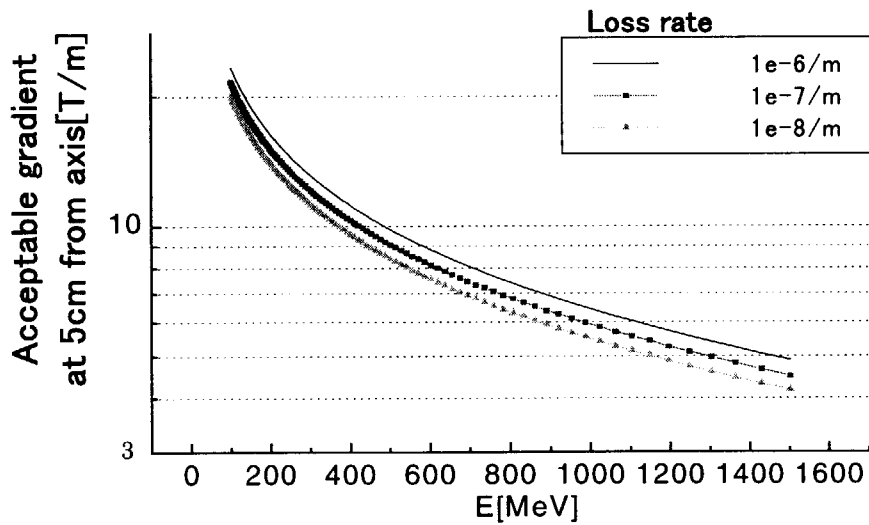


図 2.8 磁場による H⁻中性化

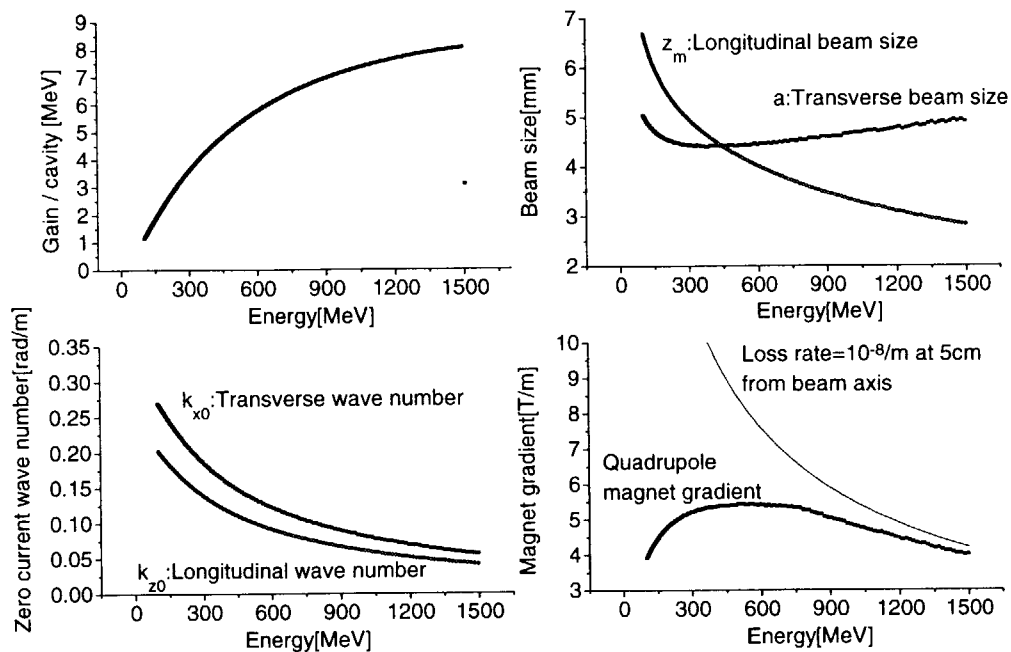


図 2.9 リファレンス加速器の設計値 (ゲインキャビティ、ビーム・サイズ、ゼロ・カレント波数及び四極電磁石磁場勾配。最終キャビティのゲインは出力エネルギーが 1.5GeV になるように決めた。)

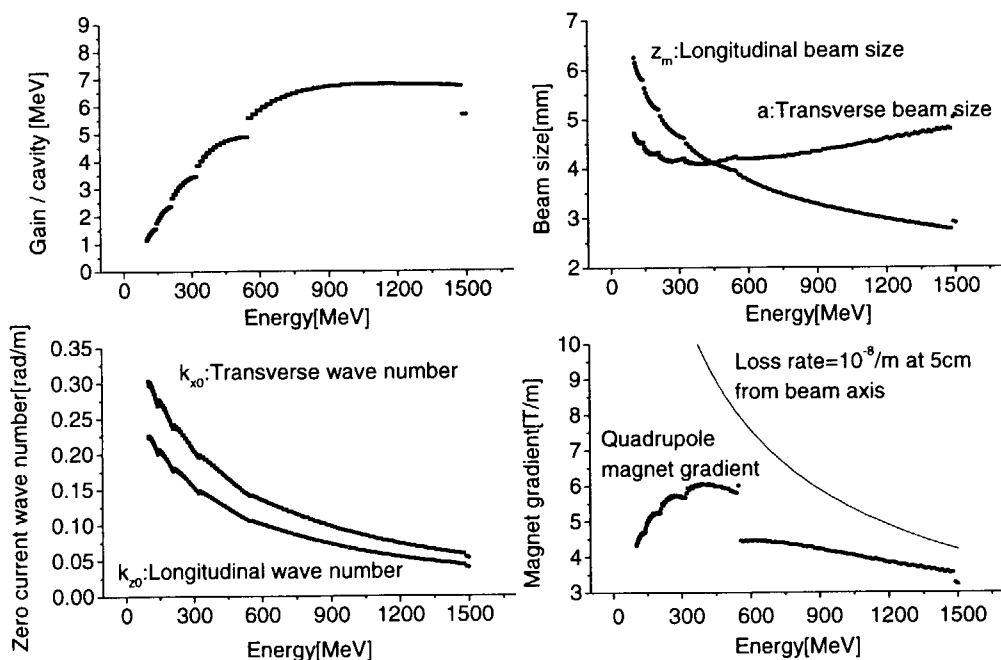


図 2.10 β セクション数 5 の加速器の設計値 (ゲインキャビティ、ビーム・サイズ、ゼロ・カレント波数及び四極電磁石磁場勾配。最終 4 キャビティのゲインは出力エネルギーが 1.5GeV になるように決めた。)

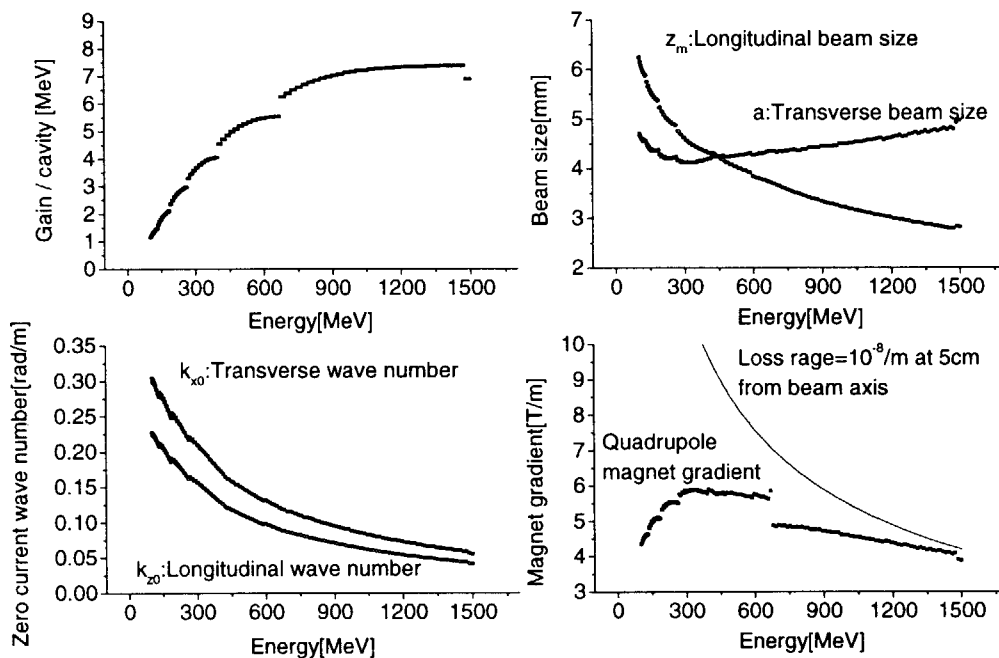


図 2.11 β セクション数6の加速器の設計値 (ゲイン/キャビティ、ビームサイズ、ゼロカレント波数及び四極電磁石磁場勾配。最終4キャビティのゲインは出力エネルギーが1.5GeVになるように決めた。)

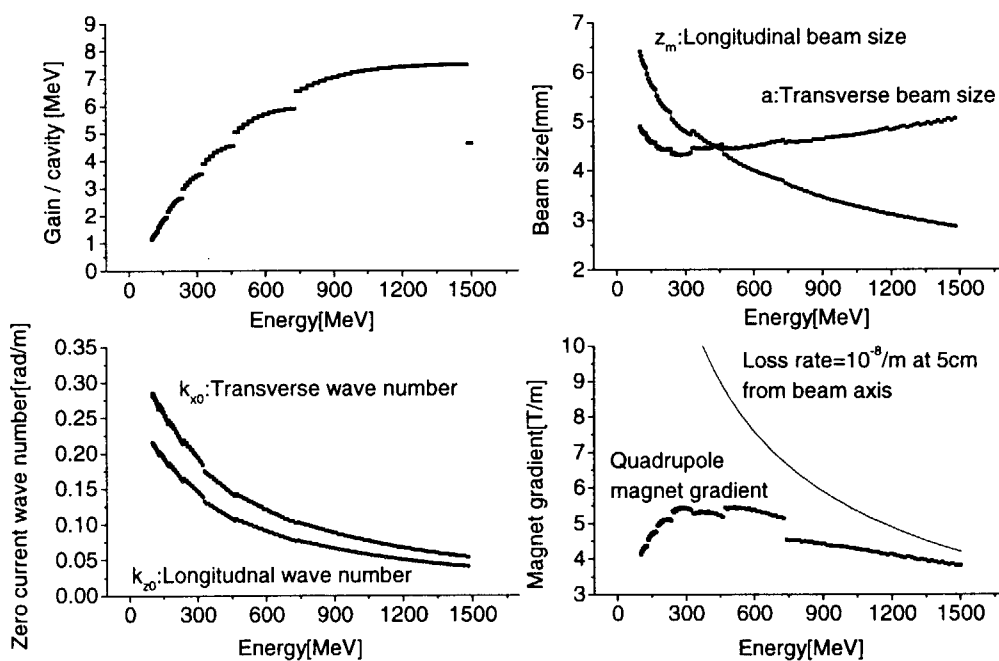


図 2.12 β セクション数7の加速器の設計値 (ゲイン/キャビティ、ビームサイズ、ゼロカレント波数及び四極電磁石磁場勾配。最終4キャビティのゲインは出力エネルギーが1.5GeVになるように決めた。)

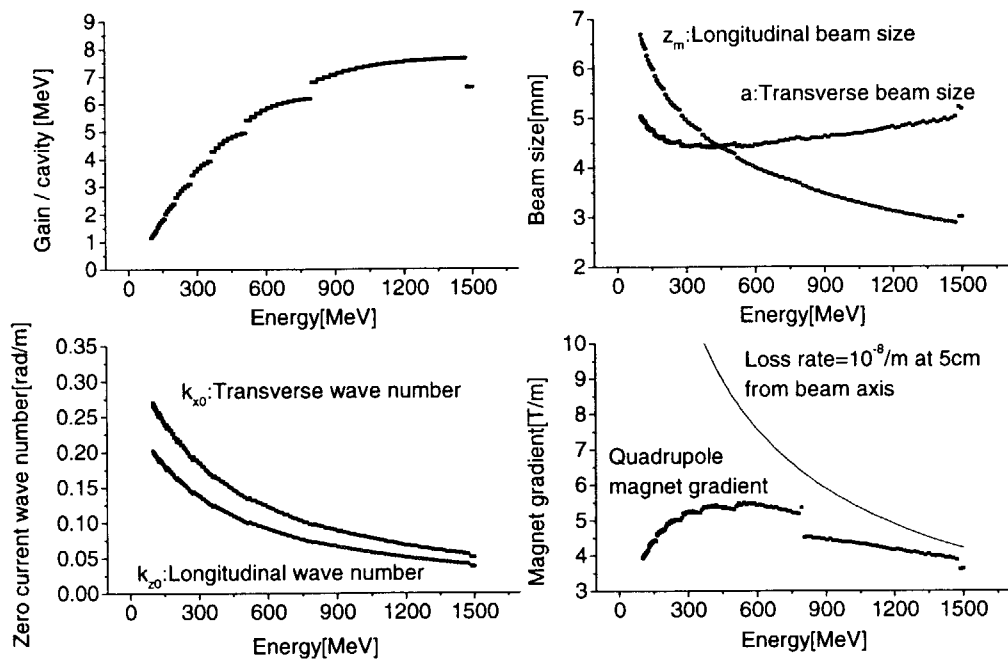


図 2.13 β セクション数 8 の加速器の設計値 (ゲイン/キャビティ、ビーム・サイズ、ゼロ・カレント波数及び四極電磁石磁場勾配。最終 4 キャビティのゲインは出力エネルギーが 1.5GeV になるように決めた。)

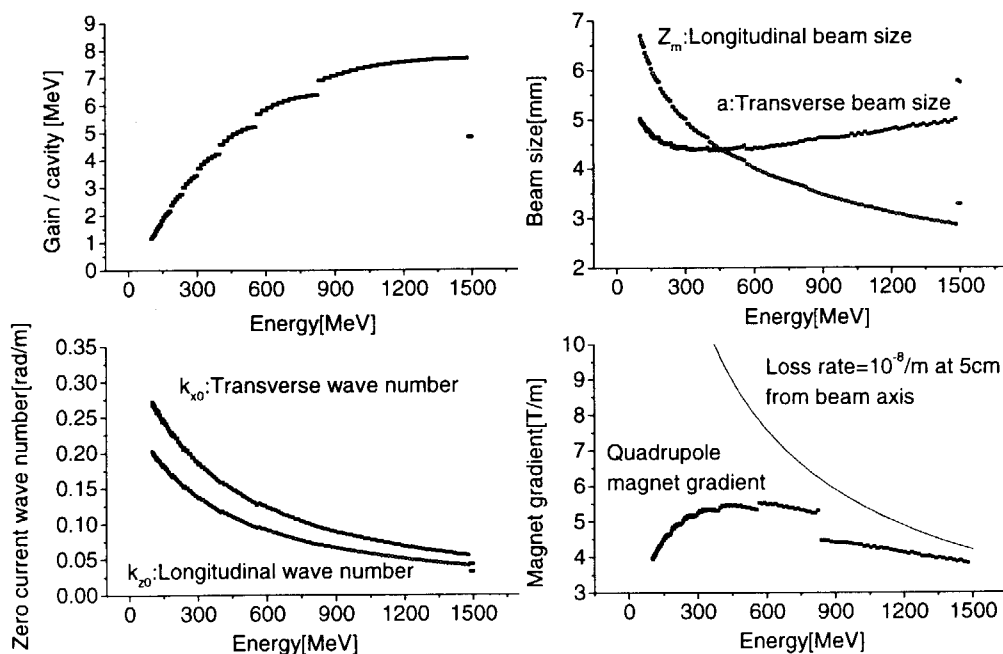


図 2.14 β セクション数 9 の加速器の設計値 (ゲイン/キャビティ、ビーム・サイズ、ゼロ・カレント波数及び四極電磁石磁場勾配。最終 4 キャビティのゲインは出力エネルギーが 1.5GeV になるように決めた。)

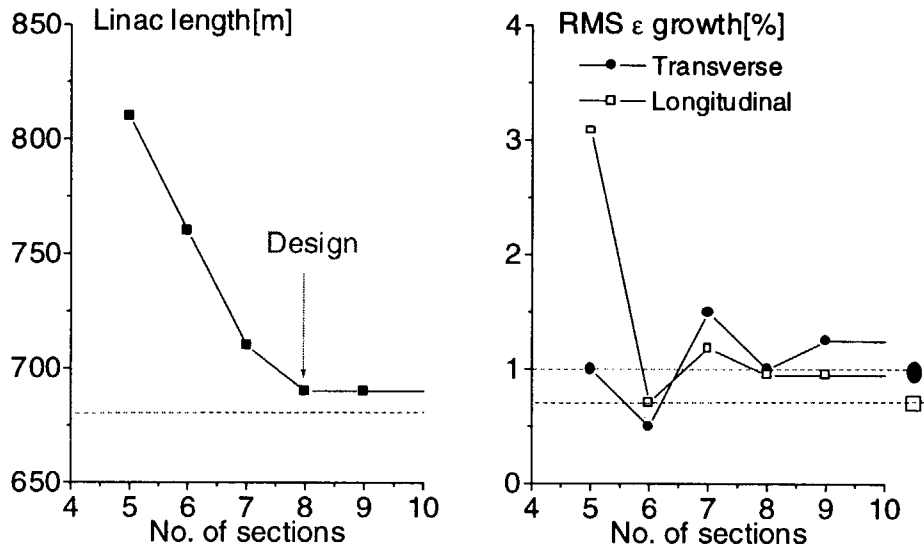


図 2.15 加速器構成検討結果

(破線はリアリス加速器の結果を示す。横方向 rms エミッタンスは X と Y の rms エミッタンスの二乗平均とした。)

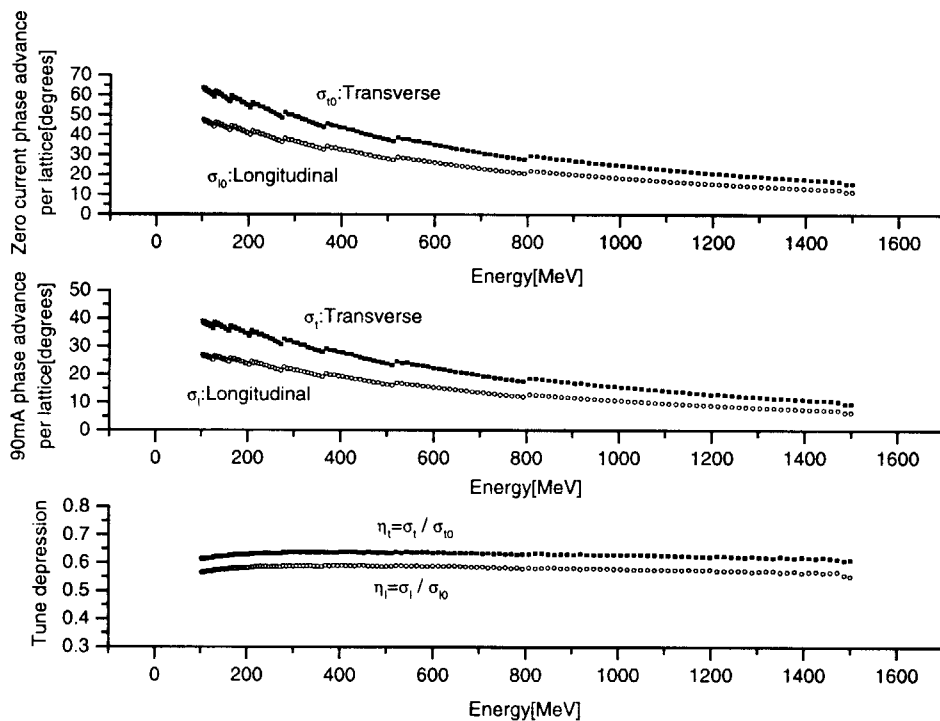


図 2.16 フェーズ・アドバンスとチューン・ディプレッション
(規格化 rms エミッタンス横: $0.04\pi\text{cm-mrad}$, 縦: $0.42\pi\text{MeV-deg}$)

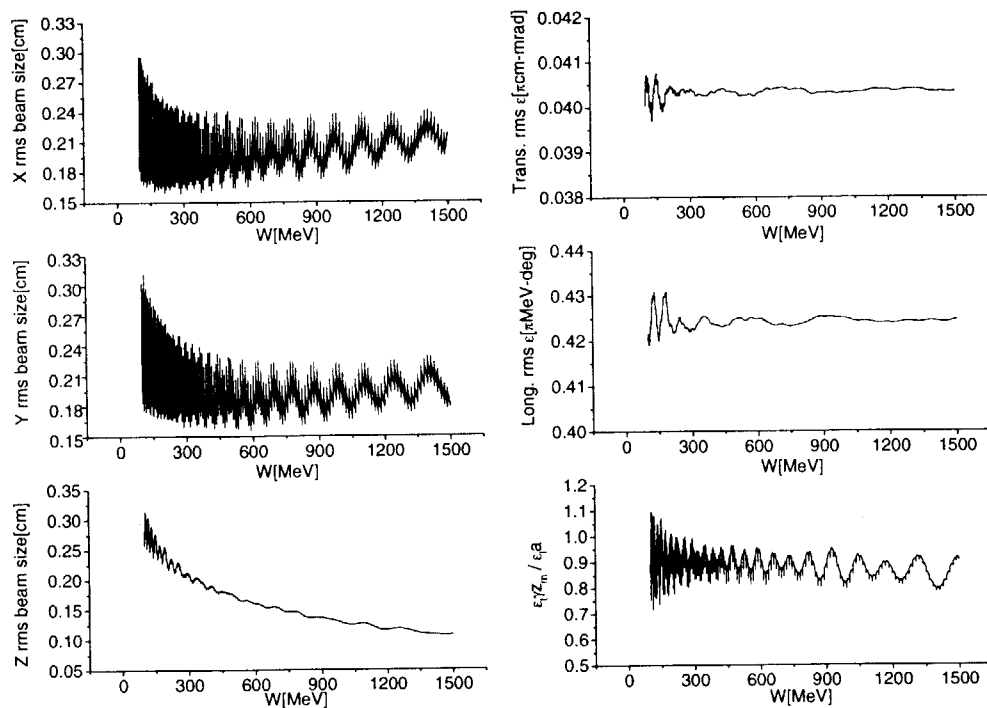


図 3.1 rms ビーム・サイズ、rms エミッタンス及び Equipartitioning factor の履歴
(横方向 rms エミッタンスを X 方向と Y 方向の rms エミッタンスの二乗平均とした)

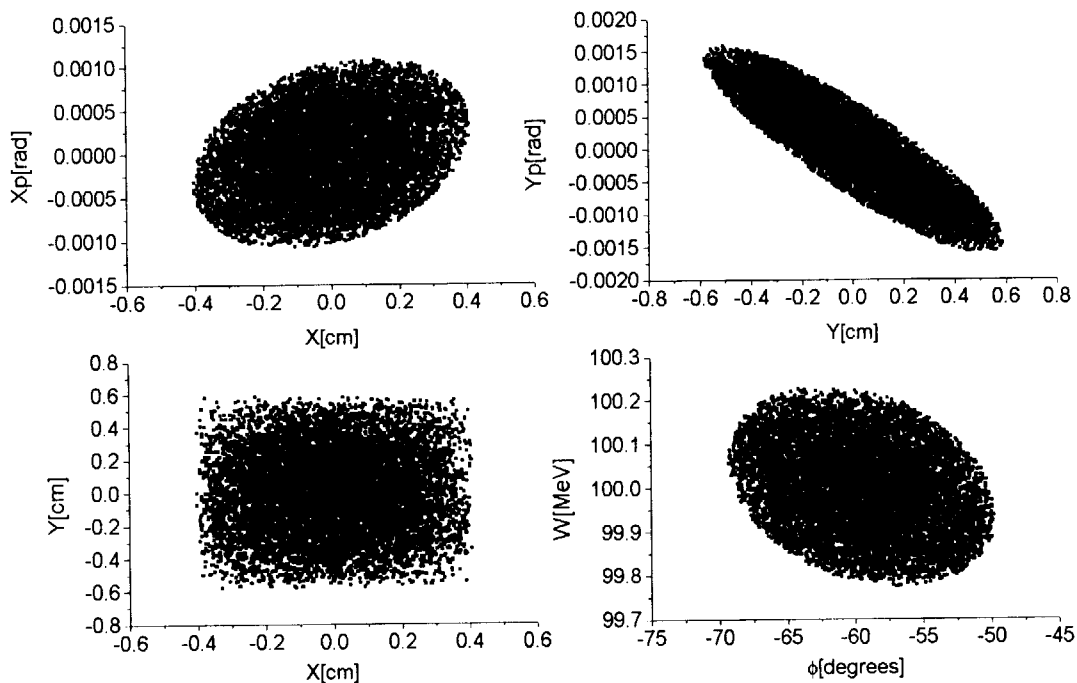


図 3.2 入射ビーム位相空間分布

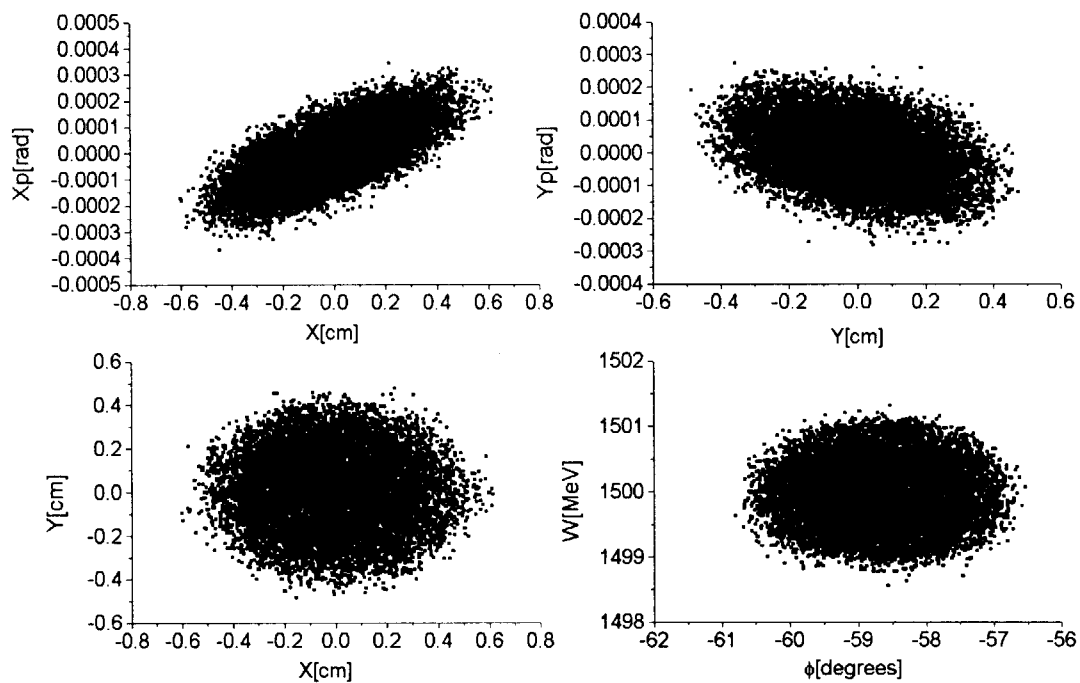


図 3.3 出力ビーム位相空間分布

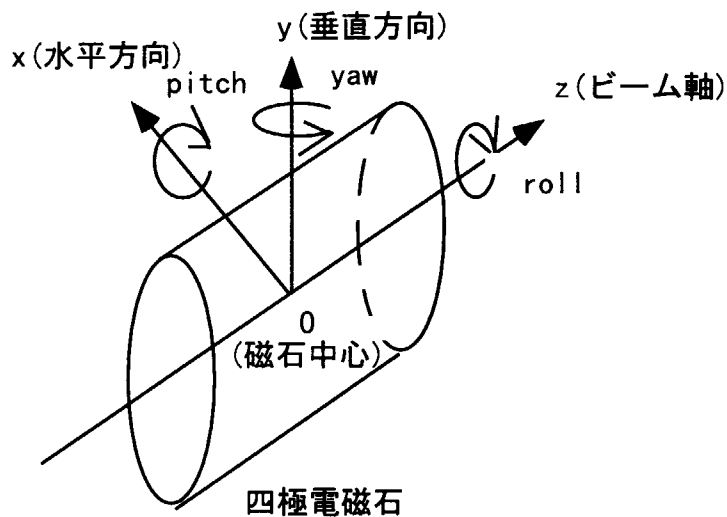


図 3.4 四極電磁石の座標定義(tilt は yaw, pitch を指す)

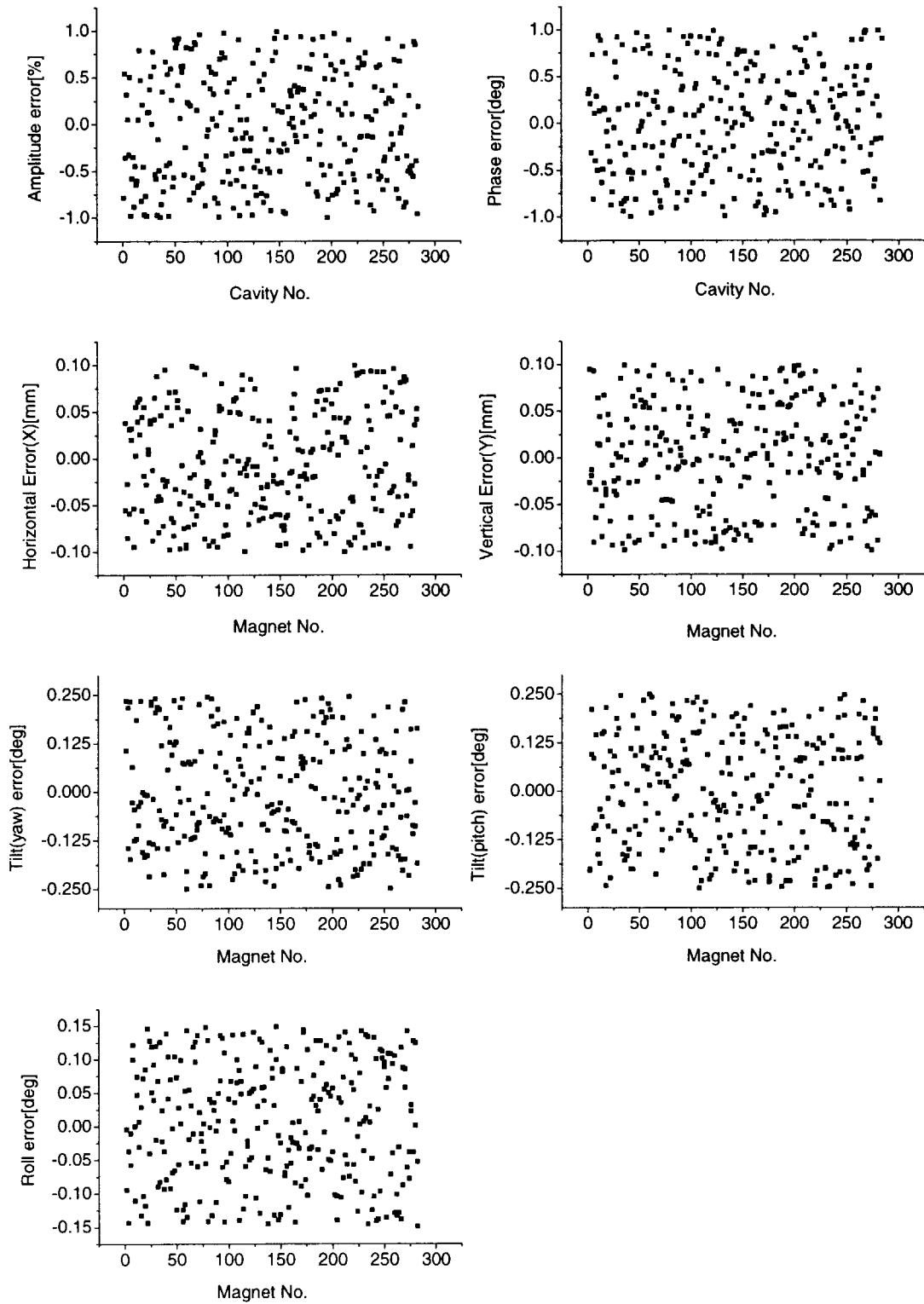


図 3.5 RF 誤差及び四極電磁石誤差例

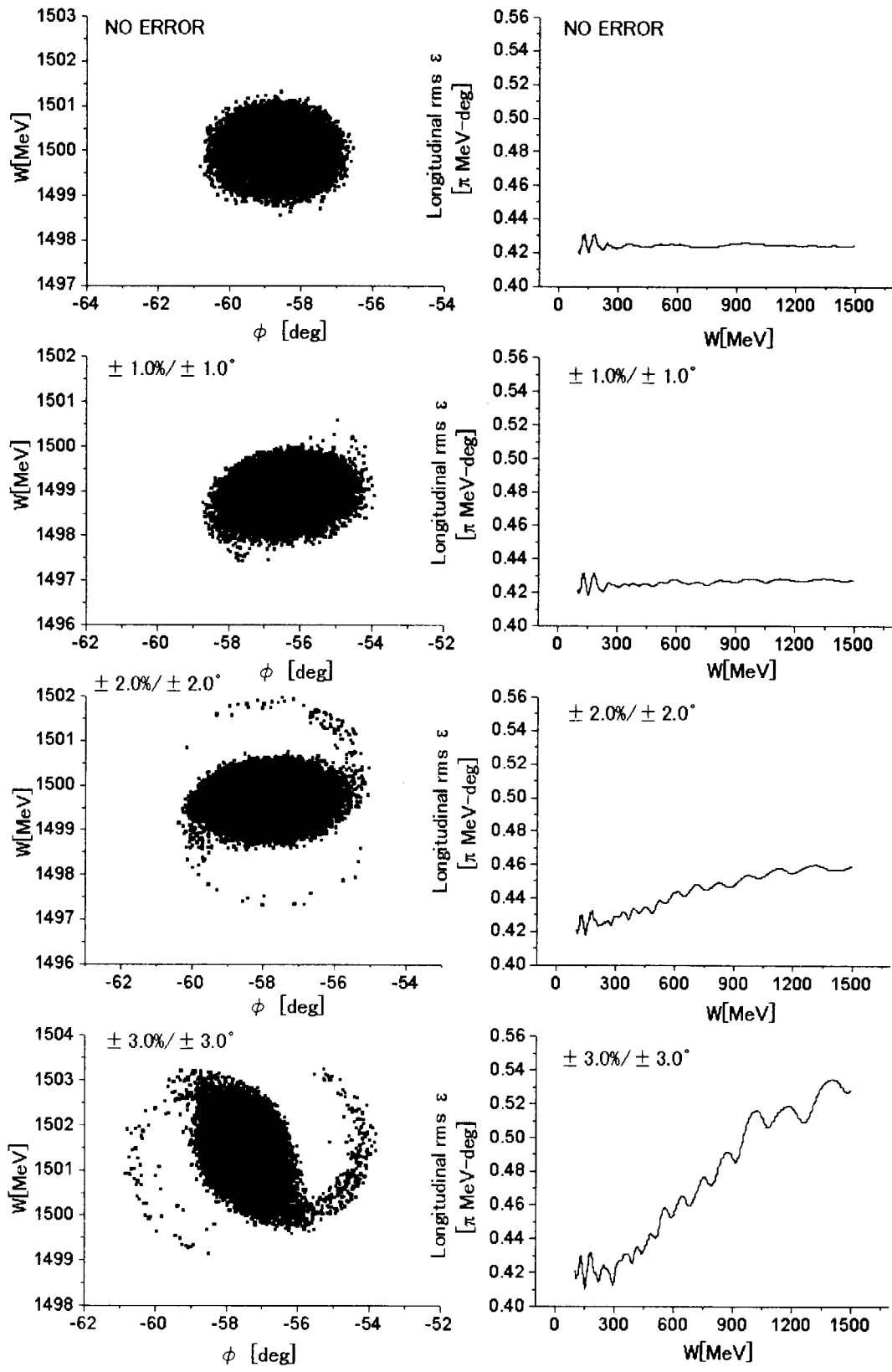


図 3.6 RF 電場/位相誤差を与えた場合のシミュレーション例
(縦方向の出力ビーム位相空間分布と rms エミッタンス)

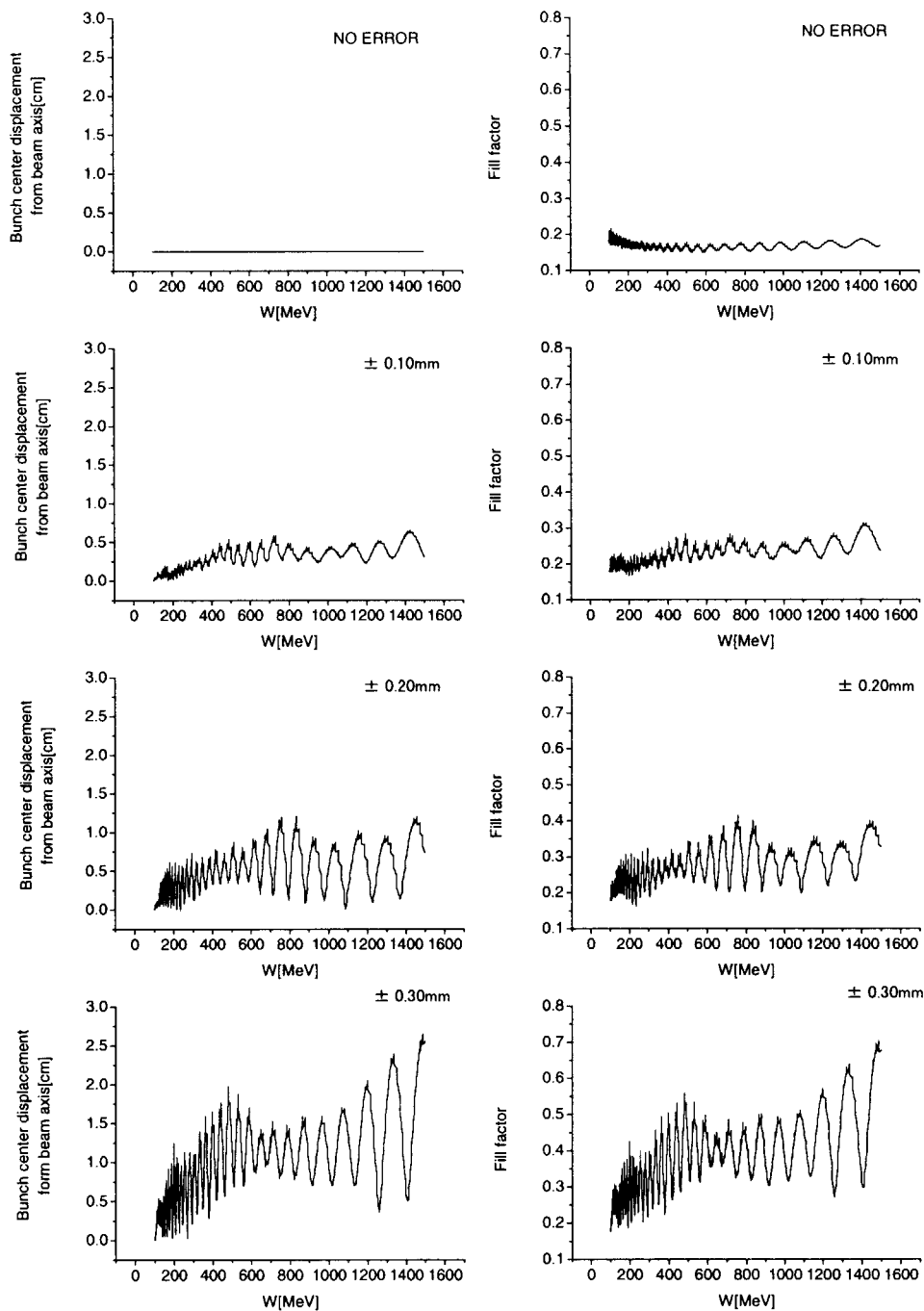


図 3.7 四極電磁石水平/垂直誤差を与えた場合のシミュレーション例
(バンチ中心のビーム軸上からのずれと fill factor)

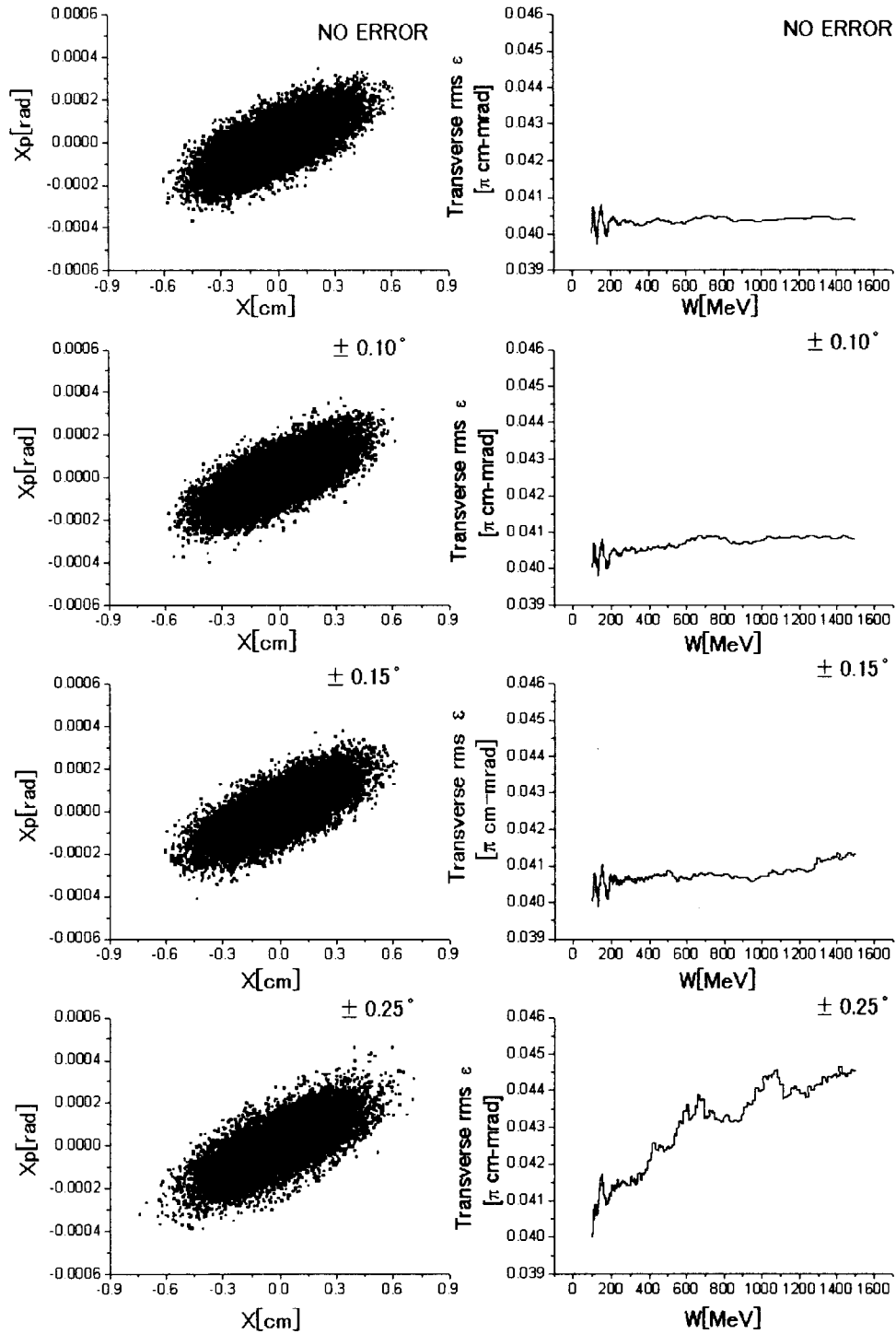


図 3.8 四極電磁石ロール誤差を与えた場合のシミュレーション例
(横方向(X)出力ビーム位相空間分布及び横方向規格化 rms エミッタンス)

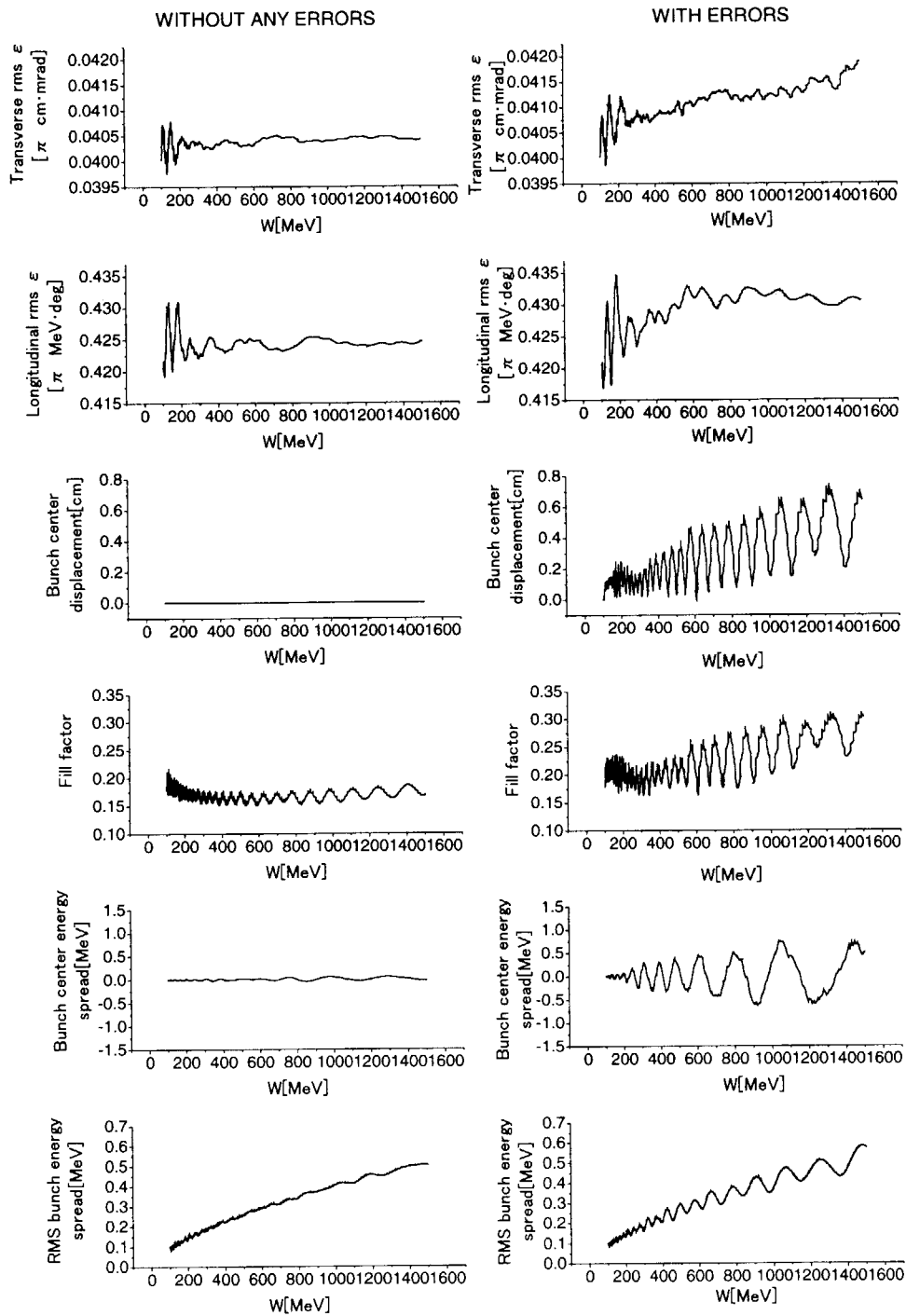


図 3.9 RF 誤差及び四極電磁石誤差を与えた場合のシミュレーション例(1/3)

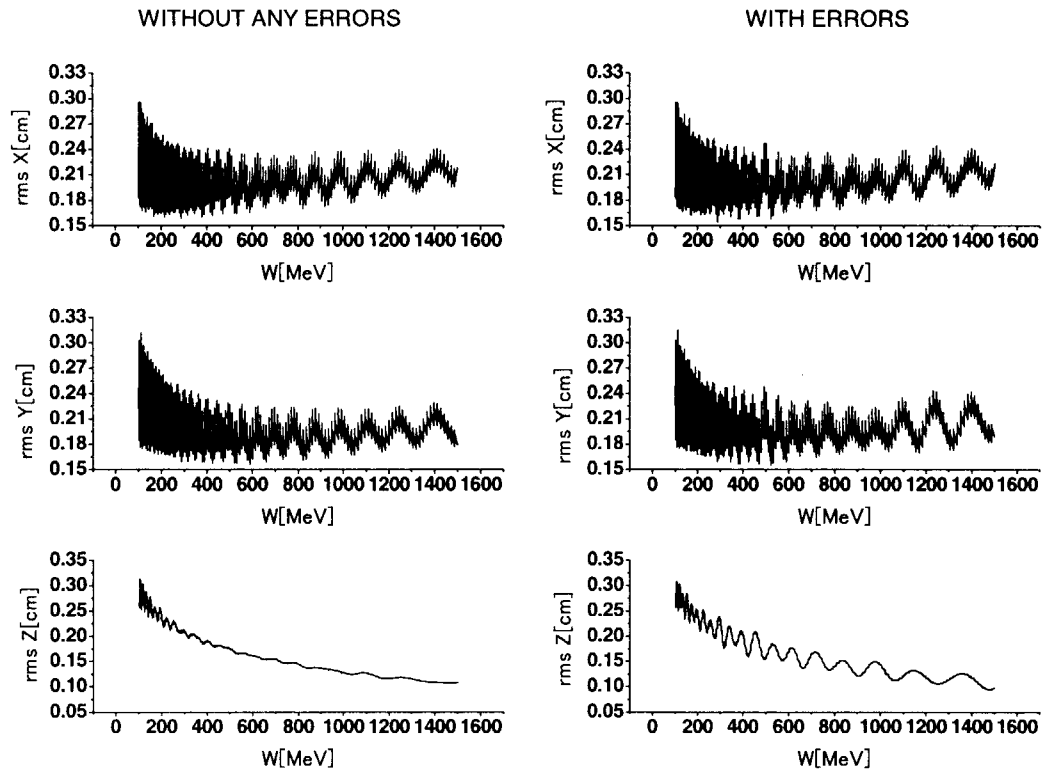


図 3.9 RF 誤差及び四極電磁石誤差を与えた場合のシミュレーション例(2/3)

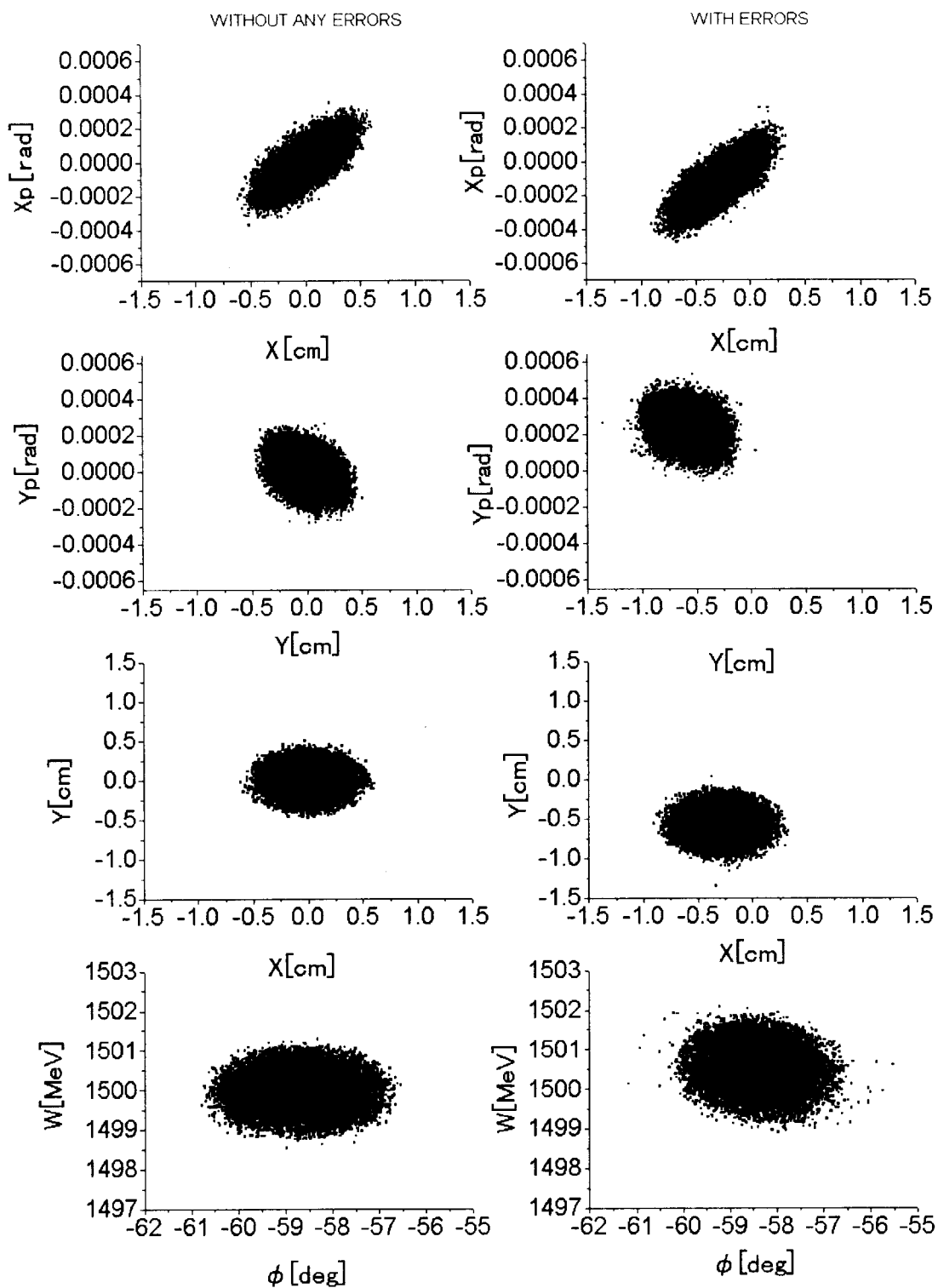


図 3.9 RF 誤差及び四極電磁石誤差を与えた場合のシミュレーション例(3/3)

付録 A 超伝導加速器ダイナミカル・パラメータ及びラティス・パラメータ(抜粋)

Dynamical parameters(4/4)

Sec.No.	セルNo	セル長[m]	E0[MV/m]	φin[deg]	φcenter[deg]	T	TP	S	SP	Wout[MeV]	βout	ゲイン[MeV]
.....												
.....												
.....												
.....												
.....												
.....												
7	323	0.20111	1.2591	-0.9744	-4.5317	-0.5000	-0.2779	-0.6761	-0.1040	782.5479	0.8381	-0.1397
7	324	0.19643	9.8435	-8.0890	-13.6547	0.7654	0.1575	-0.0911	-0.0152	783.9445	0.8384	1.3966
7	325	0.20111	8.9944	-19.2203	-22.8043	0.7912	0.1273	0.0000	0.0000	785.2639	0.8387	1.3194
7	326	0.20111	9.0426	-26.3882	-30.0001	0.7914	0.1272	0.0000	0.0000	786.5103	0.8389	1.2464
7	327	0.20111	8.9944	-33.6120	-37.2502	0.7915	0.1272	0.0000	0.0000	787.6498	0.8391	1.1396
7	328	0.19643	9.8435	-40.8883	-46.5593	0.7660	0.1579	0.0911	0.0152	788.7961	0.8394	1.1462
7	329	0.20111	1.2591	-52.2303	-55.9165	-0.5012	0.0445	0.6757	0.1044	788.8666	0.8394	0.0706
7	330	0.20111	1.2583	-0.0688	-3.7564	-0.5012	-0.2777	-0.6757	-0.1044	788.7289	0.8394	-0.1378
7	331	0.19643	9.8375	-7.4441	-13.1372	0.7661	0.1580	-0.0911	-0.0152	790.1305	0.8397	1.4016
7	332	0.20111	8.9889	-18.8303	-22.5444	0.7918	0.1272	0.0000	0.0000	791.4525	0.8399	1.3220
7	333	0.20111	9.0370	-26.2585	-30.0001	0.7920	0.1271	0.0000	0.0000	792.6990	0.8402	1.2465
7	334	0.20111	8.9889	-33.7417	-37.5093	0.7921	0.1271	0.0000	0.0000	793.8348	0.8404	1.1358
7	335	0.19643	9.8375	-41.2768	-47.0737	0.7666	0.1584	0.0910	0.0153	794.9725	0.8406	1.1377
7	336	0.20111	1.2583	-52.8706	-56.6852	-0.5025	0.0466	0.6752	0.1049	795.0454	0.8406	0.0729
8	1	0.22135	1.1603	-60.0571	-55.2012	-0.3931	-0.2977	-0.7358	-0.0737	794.8326	0.8406	-0.2128
8	2	0.21684	10.9349	-50.3454	-47.4143	0.7247	0.1404	-0.0815	-0.0088	795.8531	0.8408	1.0205
8	3	0.22135	10.1569	-44.4833	-39.6458	0.7516	0.1356	0.0000	0.0000	797.1542	0.8411	1.3011
8	4	0.22135	10.1753	-34.8083	-30.0001	0.7518	0.1355	0.0000	0.0000	798.6205	0.8414	1.4663
8	5	0.22135	10.1569	-25.1920	-20.4170	0.7519	0.1355	0.0000	0.0000	800.2048	0.8417	1.5842
8	6	0.21684	10.9349	-15.6420	-12.8297	0.7253	0.1403	0.0815	0.0088	801.9247	0.8420	1.7199
8	7	0.22135	1.1603	-10.0174	-5.3164	-0.3948	-0.0674	0.7354	0.0744	801.8412	0.8420	-0.0834
8	8	0.22135	1.1559	-58.9926	-54.2897	-0.3947	-0.2975	-0.7354	-0.0744	801.6295	0.8420	-0.2117
8	9	0.21684	10.8936	-49.5869	-46.8058	0.7255	0.1403	-0.0815	-0.0089	802.6622	0.8422	1.0327
8	10	0.22135	10.1186	-44.0248	-39.3402	0.7523	0.1354	0.0000	0.0000	803.9654	0.8424	1.3032
8	11	0.22135	10.1369	-34.6557	-30.0002	0.7525	0.1354	0.0000	0.0000	805.4276	0.8427	1.4622
8	12	0.22135	10.1186	-25.3446	-20.7215	0.7526	0.1354	0.0000	0.0000	807.0042	0.8430	1.5766
8	13	0.21684	10.8936	-16.0984	-13.4342	0.7261	0.1403	0.0815	0.0089	808.7172	0.8434	1.7130
8	14	0.22135	1.1559	-10.7700	-6.2194	-0.3963	-0.0650	0.7350	0.0750	808.6368	0.8433	-0.0804
.....												
.....												
.....												
.....												
.....												
.....												
8	659	0.22135	1.0009	-1.8429	-5.3580	-0.4788	-0.2883	-0.7094	-0.1070	1486.6809	0.9220	-0.1203
8	660	0.21684	9.4326	-8.8730	-14.1466	0.7670	0.1570	-0.0785	-0.0126	1488.1630	0.9221	1.4820
8	661	0.22135	8.7616	-19.4202	-22.9439	0.7901	0.1279	0.0000	0.0000	1489.5740	0.9222	1.4110
8	662	0.22135	8.7774	-26.4675	-30.0000	0.7901	0.1279	0.0000	0.0000	1490.9034	0.9223	1.3294
8	663	0.22135	8.7616	-33.5325	-37.0733	0.7901	0.1279	0.0000	0.0000	1492.1261	0.9224	1.2226
8	664	0.21684	9.4326	-40.6141	-45.9211	0.7672	0.1572	0.0785	0.0126	1493.3330	0.9224	1.2069
8	665	0.22135	1.0009	-51.2281	-54.7840	-0.4793	0.0751	0.7092	0.1071	1493.4001	0.9225	0.0671
8	666	0.22135	1.0009	-1.5558	-5.1122	-0.4793	-0.2882	-0.7092	-0.1071	1493.2804	0.9224	-0.1198
8	667	0.21684	9.4326	-8.6686	-13.9826	0.7672	0.1572	-0.0785	-0.0126	1494.7644	0.9225	1.4840
8	668	0.22135	8.7616	-19.2967	-22.8615	0.7903	0.1279	0.0000	0.0000	1496.1766	0.9226	1.4122
8	669	0.22135	8.7774	-26.4264	-30.0000	0.7903	0.1278	0.0000	0.0000	1497.5063	0.9227	1.3297
8	670	0.22135	8.7616	-33.5736	-37.1555	0.7903	0.1278	0.0000	0.0000	1498.7279	0.9228	1.2216
8	671	0.21684	9.4326	-40.7374	-46.0845	0.7674	0.1573	0.0785	0.0126	1499.9321	0.9229	1.2042
8	672	0.22135	1.0009	-51.4317	-55.0285	-0.4797	0.0758	0.7091	0.1073	1500.0000	0.9229	0.0678

Lattice parameters(3/3)

No.	β	磁場勾配[T/m]	磁石長[m]	磁石間[m]	キャビティ磁石[m]	キャビティ間[m]	a [mm]	zm [mm]	kx0 [rad/m]	kz0 [rad/m]	kx [rad/m]	kz [rad/m]	ラティス長[m]	$\sigma x0$ [deg]	$\sigma z0$ [deg]	σx [deg]	σz [deg]
119	0.8938	4.2137	0.35	0.50	0.70	0.50	4.76	3.16	0.071	0.053	0.044	0.030	5.2955	21.54	16.06	13.42	9.21
120	0.8954	4.1898	0.35	0.50	0.70	0.50	4.78	3.14	0.070	0.052	0.044	0.030	5.2955	21.24	15.85	13.21	9.08
121	0.8969	4.1636	0.35	0.50	0.70	0.50	4.80	3.13	0.069	0.052	0.043	0.030	5.2955	20.94	15.66	13.00	8.98
122	0.8985	4.1503	0.35	0.50	0.70	0.50	4.81	3.11	0.068	0.051	0.042	0.029	5.2955	20.63	15.46	12.79	8.86
123	0.9000	4.1763	0.35	0.50	0.70	0.50	4.78	3.10	0.068	0.050	0.042	0.029	5.2955	20.63	15.28	12.87	8.69
124	0.9014	4.1482	0.35	0.50	0.70	0.50	4.80	3.09	0.067	0.050	0.042	0.028	5.2955	20.33	15.08	12.66	8.59
125	0.9029	4.1227	0.35	0.50	0.70	0.50	4.82	3.07	0.066	0.049	0.041	0.028	5.2955	20.02	14.91	12.44	8.50
126	0.9043	4.0949	0.35	0.50	0.70	0.50	4.84	3.05	0.065	0.049	0.040	0.028	5.2955	19.72	14.72	12.22	8.40
127	0.9056	4.0752	0.35	0.50	0.70	0.50	4.87	3.04	0.064	0.048	0.040	0.027	5.2955	19.42	14.55	12.00	8.32
128	0.9070	4.0895	0.35	0.50	0.70	0.50	4.83	3.03	0.064	0.047	0.040	0.027	5.2955	19.42	14.37	12.08	8.14
129	0.9083	4.0702	0.35	0.50	0.70	0.50	4.86	3.02	0.063	0.047	0.039	0.027	5.2955	19.11	14.20	11.85	8.07
130	0.9096	4.0404	0.35	0.50	0.70	0.50	4.88	3.00	0.062	0.046	0.038	0.026	5.2955	18.81	14.03	11.63	7.98
131	0.9108	4.0082	0.35	0.50	0.70	0.50	4.91	2.98	0.061	0.046	0.038	0.026	5.2955	18.51	13.87	11.41	7.91
132	0.9121	4.0316	0.35	0.50	0.70	0.50	4.87	2.98	0.061	0.045	0.038	0.026	5.2955	18.51	13.70	11.48	7.75
133	0.9133	3.9996	0.35	0.50	0.70	0.50	4.90	2.96	0.060	0.045	0.037	0.025	5.2955	18.20	13.55	11.25	7.68
134	0.9145	3.9678	0.35	0.50	0.70	0.50	4.93	2.94	0.059	0.044	0.036	0.025	5.2955	17.90	13.39	11.02	7.61
135	0.9156	3.9865	0.35	0.50	0.70	0.50	4.90	2.94	0.059	0.044	0.037	0.025	5.2955	17.90	13.25	11.09	7.47
136	0.9168	3.9550	0.35	0.50	0.70	0.50	4.93	2.92	0.058	0.043	0.036	0.024	5.2955	17.60	13.09	10.86	7.40
137	0.9179	3.9208	0.35	0.50	0.70	0.50	4.97	2.90	0.057	0.043	0.035	0.024	5.2955	17.29	12.95	10.63	7.34
138	0.9190	3.9402	0.35	0.50	0.70	0.50	4.94	2.90	0.057	0.042	0.035	0.024	5.2955	17.29	12.80	10.69	7.21
139	0.9201	3.9063	0.35	0.50	0.70	0.50	4.97	2.88	0.056	0.042	0.035	0.024	5.2955	16.99	12.66	10.46	7.15
140	0.9211	3.8697	0.35	0.50	0.70	0.50	5.01	2.87	0.055	0.041	0.034	0.023	5.2955	16.69	12.52	10.22	7.09
141	0.9220	3.8094	0.35	0.50	0.70	0.50	5.21	2.99	0.051	0.038	0.031	0.021	5.2955	15.47	11.51	9.40	6.39
142	0.9229	3.6227	0.35	0.50	0.70	0.50	5.18	2.99	0.051	0.038	0.031	0.021	5.2955	15.47	11.40	9.44	6.29

付録 B 超伝導加速器加速周波数依存性の検討

要旨

RFQ、DTL 及び超伝導加速周波数をいくつにするかの議論がなされており、下記 2 ケースについて超伝導加速器構成における相違点を明確にする。

ケース(1)超伝導加速器:600MHz

ケース(2)超伝導加速器:700MHz

1. 加速器構成検討

1.1 基本パラメータ等設定

表 1.1 に示すように、ケース(1)の従来の基本パラメータとしては加速周波数:600MHz、エネルギー範囲:100-1500MeV、ビーム・ピーク電流:30mA、 E_{peak} (surface electrical peak field):16MV/m が与えられており、 β セクション数:8、セル/キャビティ:5、収束系:ダブルレット、キャビティ/収束区間:2 で検討を進めている。これに対してケース(2)は、表 1.2 に示すようにケース(1)との比較のため加速周波数を 700MHz とする以外はケース(1)と同じとする。なお、ケース(1)、ケース(2)いずれの場合も、同一 β セクション内のキャビティに供給する RF パワーは一定にするとした。

1.2 キャビティ形状設定

キャビティ形状の基本パラメータとしてはアイリス半径 (ボア半径) :7.5cm が与えられている。一案として表 1.3 に示すようにジオメトリカル β_g 、テーパ角、アイリス短径/半セル長、アイリス長径/アイリス短径、センタ・セル赤道直線長/半セル、アイリス直線長/半セルを設定し、SUPERFISH によりキャビティを設計した。

これに対して、ケース(2)のキャビティ基本パラメータ案をケース(1)との周波数比を考慮し表 1.4 に示すように設定し、SUPERFISH によりキャビティを設計した。なお、アイリス直線長/半セルは加工上の観点よりケース(1)の値(2mm)を維持した。

表 1.1 ケース(1)の基本パラメータ等

加速周波数	600MHz	β セクション数	8
エネルギー範囲	100-1500MeV	セル/キャビティ	5
加速粒子	H^+ , H^-	収束系	ダブルレット
ビーム・ピーク電流	30mA	キャビティ/収束区間	2
E_{peak} (Surface electrical peak field)	16MV/m		

表 1.2 ケース(2)の基本パラメータ等

加速周波数	700MHz	β セクション数	8
エネルギー範囲	100-1500MeV	セル/キャビティ	5
加速粒子	H^+ , H^-	収束系	ダブルレット
ビーム・ピーク電流	30mA	キャビティ/収束区間	2
E_{peak} (Surface electrical peak field)	16MV/m		

1.3 キャビティパラメータ及び加速器構成比較

SUPERFISHによる計算の結果、ジオメトリカル・ファクタ($Q \cdot R_s$), R/Q , $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$, E_{acc} についてはケース(1)とケース(2)でほぼ同じ値となった。これはケース(1)とケース(2)の形状がほぼ相似形になっているためと考えられる。 E_{acc} がほぼ同じであり、ケース(1)のキャビティ長:ケース(2)のキャビティ長 $\approx 7:6$ とほぼ波長比になるため、エネルギー・ゲイン、パワー/キャビティがケース(1):ケース(2) $\approx 7:6$ となっている。電流値が $18\text{mA}(=30\text{mA} \times 0.6, 0.6$:チョッピングファクタ)の場合、パワー/キャビティは最大でケース(1)が 121kW 、ケース(2)が 104kW と見積もられた。

キャビティの総数はケース(1)が308、ケース(2)が356と見積もられケース(1):ケース(2) $\approx 6:7$ とほぼ周波数比となった。

壁ロスは、運転温度が 4K の場合ケース(1)が $35\text{kW}(R_s=200\text{n}\Omega)$ 、ケース(2)が $41\text{kW}(R_s=270\text{n}\Omega)$ 、運転温度が 2K の場合ケース(1)が $3.4\text{kW}(R_s=20\text{n}\Omega)$ 、ケース(2)が $3.3\text{kW}(R_s=22\text{n}\Omega)$ と見積もられた。運転温度で壁ロスの大きさが逆点するのは R/Q がほぼ同じであること、ケース(2)のキャビティ1個あたりにかかる電圧がケース(1)のほぼ $6/7$ であること、かつ表面抵抗 R_s が 2K でケース(1)とケース(2)とでほぼ同じになることによると考えられる。

さて、ケース(1)とケース(2)の加速器長の見積もりにあたって、2キャビティ/収束区間としキャビティ間距離、キャビティ-Qマグネット間距離、Qマグネット間距離、Qマグネット長をケース(1)、ケース(2)共に図1.1のような案とする。キャビティ間距離、キャビティ-Qマグネット間距離はRFの要素に加えてクライオスタット内の機械的干渉を避ける、十分な断熱距離を取るといった装備設計、断熱設計の要素が大きいと考える。クライオスタット設計については現在進行中であり、ここでは特に根拠はないが一案としてキャビティ間距離を 60cm 、キャビティ-Qマグネット間距離を 70cm とおいた。Qマグネット間距離については真空排気ダクトをQマグネット間に引いた場合のコンダクタンスを考慮して 30cm とした。Qマグネット長については、現在検討されているEquipartitioningによる磁場勾配と磁場による H^- のローレンツ・ストリッピング制約を考慮して決める必要があるが、ここでは一律 30cm とした。また、 β セクション間にはマッチング・セクションを設ける必要があるが、ここではマッチング・セクションの長さについては考えないものとした。以上の設定の場合、ケース(1)の加速器長は 723m 、ケース(2)の加速器長は 793m と見積もられる。なお、加速器長の目標として 700m が与えられており、また加速器構成としてはマッチング・セクション、ビーム診断系、冗長モジュール等の追加する必要がある。これらについては加速周波数決定後に E_{peak} 、キャビティ/収束区間などをビーム・ダイナミクスをにらみながら再検討することにより最適化を図ることとする。

以上の比較を表1.5にまとめる。キャビティ長、1キャビティあたりのエネルギー・ゲイン及び1空洞に必要なパワーはほぼ波長比でケース(1)の方がケース(2)よりも大きくなった。ジオメトリカル・ファクタ、 R/Q 、 $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ はほぼ同等となった。空洞総数はほぼ周波数比でケース(1)よりもケース(2)の方が大きくなった。壁ロスは 4K 運転の場合、ほぼ周波数比でケース(1)よりもケース(2)の方が大きくなったが、 2K 運転の場合、両者はほぼ同等となった。加速器長はケース(1)よりもケース(2)の方がドリフト・スペースが多い分長くなった。

表 1.3 ケース(1)のキャビティ基本パラメータ案

$\beta_p (=2 \times \text{センタ・セル長} / \text{波長})$	0.453, 0.499, 0.549, 0.604, 0.665, 0.732, 0.805, 0.886		
アイリス半径(ホア半径)	7.5cm	アイリス長径/アイリス短径	2
テーパ角	5°, 10°	センタ・セル赤道直線長/半セル	6mm
アイリス短径/半セル長	0.28	アイリス直線長/半セル	2mm

表 1.4 ケース(2)のキャビティ基本パラメータ案

$\beta_{qq} (=2 \times \text{センタ・セル長} / \text{波長})$	0.453, 0.499, 0.549, 0.604, 0.665, 0.732, 0.805, 0.886		
アイリス半径(ホア半径)	6.4cm	アイリス長径/アイリス短径	2
テーパ角	5°, 10°	センタ・セル赤道直線長/半セル	5mm
アイリス短径/半セル長	0.28	アイリス直線長/半セル	2mm

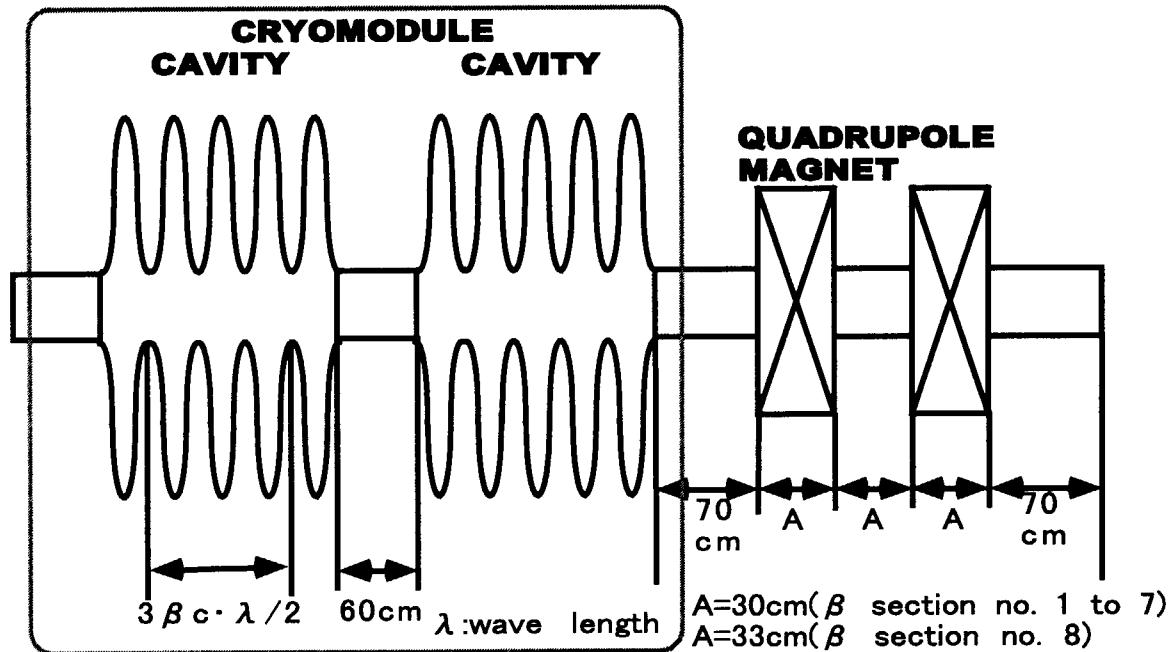


図 1.1 収束系の構成

表 1.5 キャビティパラメータ及び加速器構成比較

項目	ケース(1)	ケース(2)	備考
加速周波数	600MHz	700MHz	
キャビティ長	55.68-109.88cm	47.97-94.23cm	ほぼ波長比。
ジオメトリカル・ファクタ(Q・R _s)	125.2-234.7Ω	124.3-234.0Ω	ほぼ同等。
R/Q	52.6-444.8Ω/cavity	53.3-446.8Ω/cavity	ほぼ同等。
E _{peak} /E _{acc}	6.53-2.28	6.54-2.26	ほぼ同等。
E _{acc}	2.45-7.03MV/m	2.45-7.09MV/m	ほぼ同等。
エネルギー・ゲイン	1.18-6.69MeV/cavity	1.02-5.79MeV/cavity	ほぼ波長比。φ s = -30°
パワー・キャビティ@18mA	21-121kW	18-104kW	ほぼ波長比。ピーク電流 30mA × チョッピング 0.6
キャビティ総数	308	356	ほぼ周波数比
壁ロス	35kW @4K 3.4kW @2K	41kW @4K 3.3kW @2K	R _s (4K, 2K) ケース(1):200nΩ, 20nΩ ケース(2):270nΩ, 22nΩ
加速器長	723m	793m	図 1.1 の収束系構成。 マッチング・セクション含まず。 周波数決定後最適化再検討。

付録 C 超伝導加速器エミッタンス、ビーム電流、Tune depression、ビーム・サイズに関する考察

1. 目的

ビーム・シミュレーションによりエミッタンス、ビーム電流、Tune depression、ビーム・サイズの関係について調べる。

2. 検討条件

2.1 入射ビーム

- (1) 加速周波数は 600MHz、加速粒子は陽子、入射エネルギーは 100MeV とし、入射ビームの規格化 rms エミッタンスは次の 2 ケースを考える。また、入射ビームの分布は XYZ で一様分布とする。

Case 1. 横: $0.02\pi\text{cm-mrad}$, 縦: $0.21\pi\text{deg-MeV}$

Case 2. 横: $0.04\pi\text{cm-mrad}$, 縦: $0.42\pi\text{deg-MeV}$

2.2 加速器構成

加速器構成は下記を想定する。

- (1) $E_{\text{peak}} \leq 16\text{MV/m}$
 (2) 5セル/キャビティ
 (3) エネルギー: 100MeV~1.5GeV
 (4) 空洞形状は入射ビームと同期するものとする(キャビティ数 281)。キャビティの中心加速位相を -30° とする。
 (5) キャビティ軸上の規格化電場 $E(z)$ は偶関数であり次で表されるものとする。ただし、 $E(0)=1$ 、 z の単位は cm、ジオメトリは図 2.1 のとおりであり、ビーム・パイプ部のバーチャル・セルはセンター・セル長分を考慮するものとする。また、 β_g : キャビティ: ジオメトリカル β , $\lambda=c/f$ [cm], c : 光速度, $f=600\text{MHz}$ 。

バーチャル・セル (区間 $B_1[\text{cm}] \sim E_1[\text{cm}]$)

$$E(z) = 1.26^{(z+57.32082\beta_g+0.09163)}$$

エンド半セル 1 (区間 $E_1[\text{cm}] \sim E_M+\Delta[\text{cm}]$)

$$E(z) = \cos((z+B_c)/A_c) + 0.015(z+B_c)$$

エンド半セル 2 (区間 $E_M+\Delta[\text{cm}] \sim S_2[\text{cm}]$)

$$E(z) = \cos(2\pi(z-E_M-\Delta)/(S_2-E_M-\Delta)/4) \\ - A(-1 + \cos(3 \times 2\pi(z-E_M-\Delta)/(S_2-E_M-\Delta)/4)) \\ - B(z-E_M-\Delta)^2$$

2nd セル (区間 $S_2[\text{cm}] \sim S_1[\text{cm}]$)

$$E(z) = P \cdot \cos(2\pi z/(\beta_g \lambda))$$

$$+A(-1+\cos(3 \times 2 \pi (z+\beta_g \lambda/2)/(\beta_g \lambda)))$$

$$+B(z+\beta_g \lambda/2)^2$$

センター半セル (区間 $S_1[\text{cm}] \sim 0$)

$$E(z)=\cos(2 \pi z/(\beta_g \lambda))$$

$$-A(-1+\cos(3 \times 2 \pi z/(\beta_g \lambda)))$$

$$-B z^2$$

ここで

$$B_1=-(\beta_g \lambda/2 \times 7/2 - 2 \times 0.5 + 2 \times E_p) \quad [\text{cm}]$$

$$E_1=-(\beta_g \lambda/2 \times 5/2 - 2 \times 0.5 + 2 \times E_p) \quad [\text{cm}]$$

$$E_M=-(\beta_g \lambda/2 \times 4/2 - 0.5 + E_p) \quad [\text{cm}]$$

$$\Delta=-1.99739\beta_g^2+3.99316\beta_g-2.50346 \quad [\text{cm}]$$

$$S_2=-\beta_g \lambda/2 \times 3/2 \quad [\text{cm}]$$

$$S_1=-\beta_g \lambda/2/2 \quad [\text{cm}]$$

$$E_p=-1.7265\beta_g^3+4.07136\beta_g^2-3.0701\beta_g+0.99977 \quad [\text{cm}]$$

$$A_c=8.86235\beta_g+1.73473$$

$$B_c=50.39771\beta_g+0.57309$$

$$A=0.08331\beta_g-0.03059$$

$$B=0.01122\beta_g^3-0.02631\beta_g^2+0.02071\beta_g-0.00515$$

$$P=-2.13521\beta_g^4+6.53697\beta_g^3-7.40341\beta_g^2+3.70889\beta_g+0.29291$$

(6) E_{peak}/E_0 は次で表されるものとする。

$$E_{\text{peak}}/E_0=47.33399\beta_g^4-149.19769\beta_g^3+180.16545\beta_g^2$$

$$-101.11429\beta_g+24.22104$$

ここで、 $E_0=(\text{キャビティにかかる電圧})/(\text{キャビティのセル部の長さ})$ [MV/m]
とする。

(7) ラティス構成は図 2.2 のとおりとし、四極電磁石磁場勾配は Equipartitioned condition を満たすように求める。電流値によって多少異なるが四極電磁石磁場勾配及び 0 カレントのフェーズ・アドバンスは図 2.3 のとおりとする。

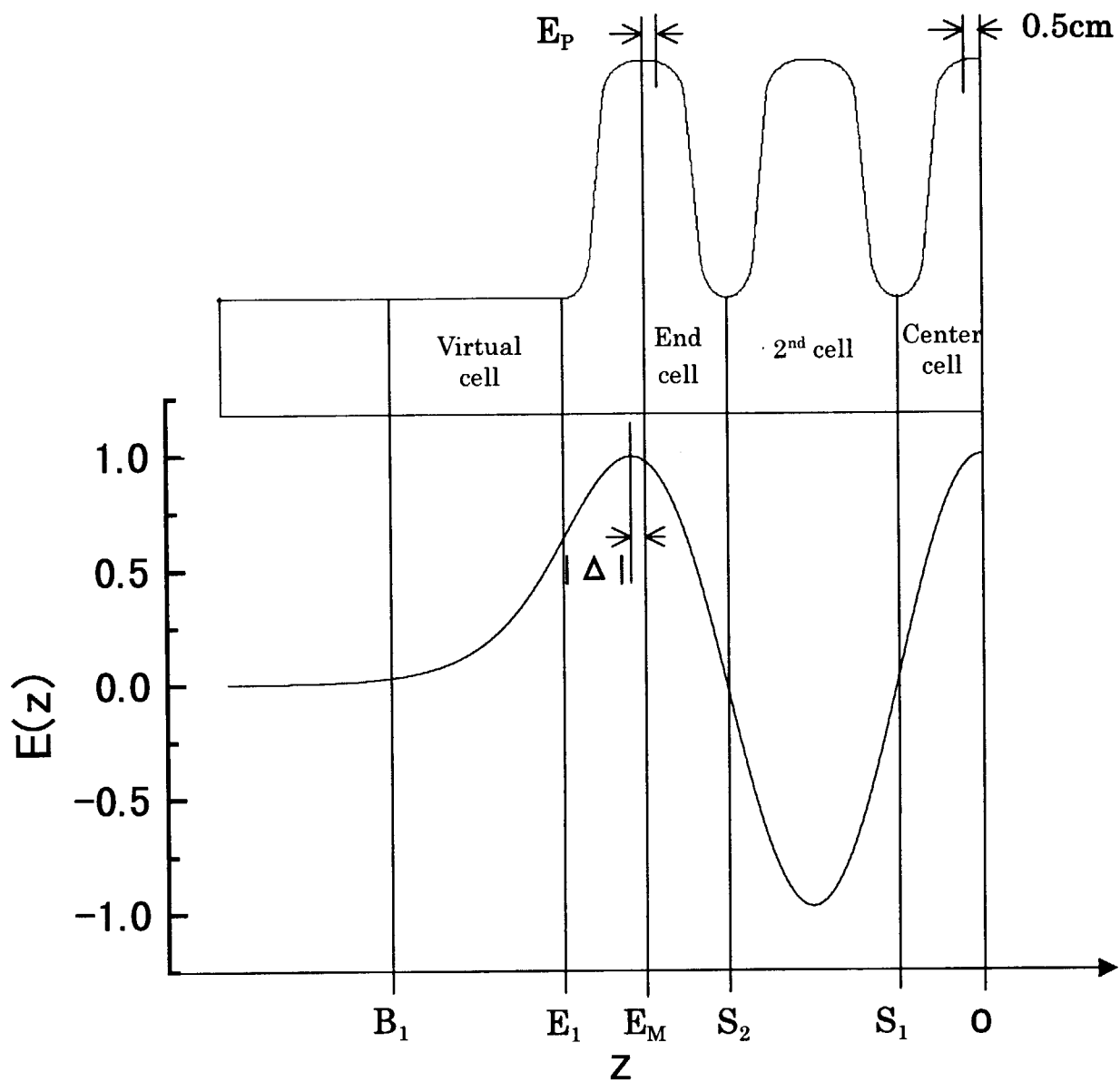


図 2.1 キャビティのジオメトリ

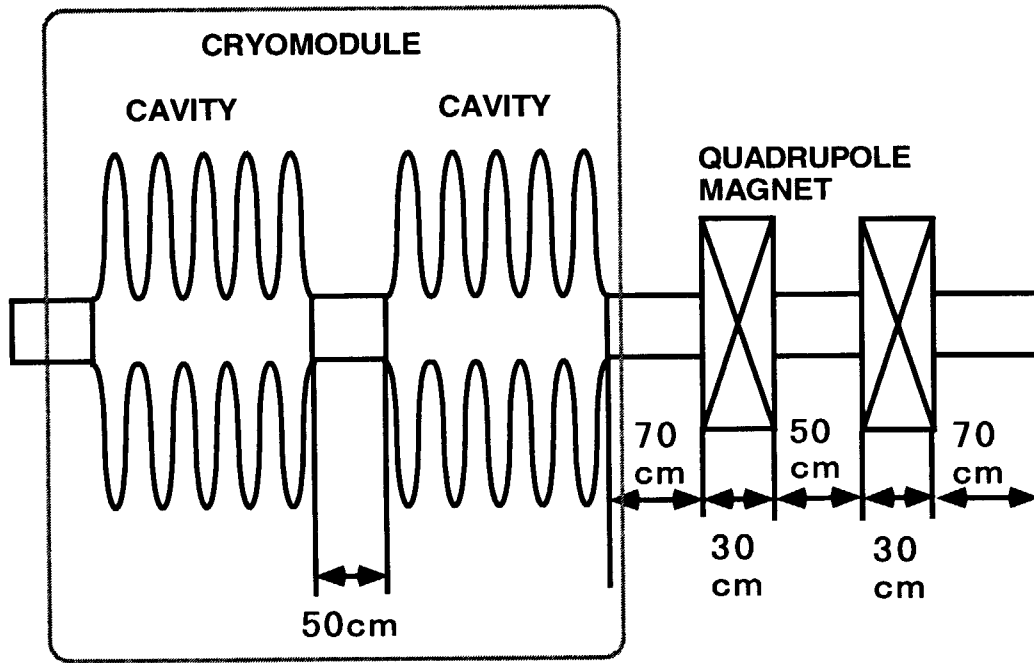


図 2.2 ラティス構成

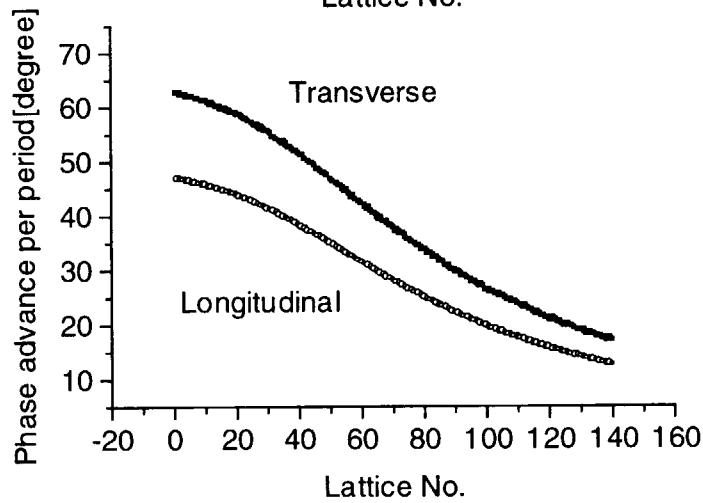
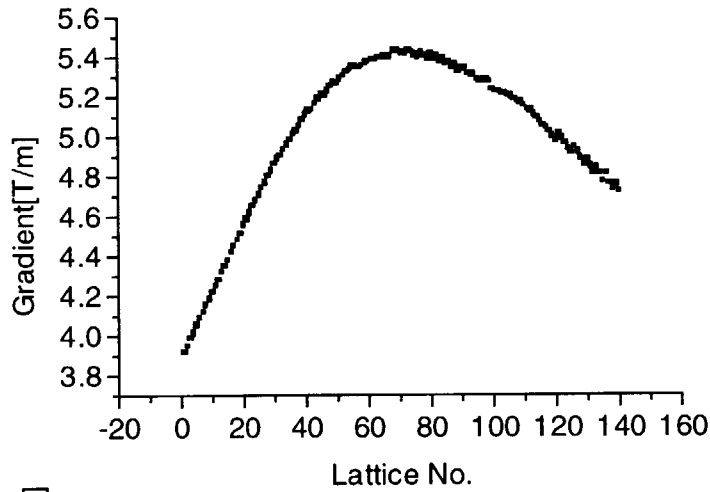


図 2.3 磁場勾配とフェーズ・アドバンス

3. 検討結果

ビーム電流値を振ってシミュレーションを行った。Case 1 と Case 2 の Tune depression, ビーム・サイズ、rms エミッタンス、出力ビーム形状を図 3.1~3.4 に示す。なお、Transverse rms emittance ϵ_t 及び whole rms emittance ϵ_w を次のように定義した。

$$\epsilon_t = \sqrt{(\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2)/2}$$

$$\epsilon_w = \sqrt{(\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2)/3}$$

ここで $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ は x, y, z 方向の規格化 rms emittance

図より次のことが考察される。

- (1) 今回の設計では、加速エネルギー範囲全体で横と縦の Tune depression がほぼ一定となった。よって、Tune depression が加速器全体の性能を示す指標として採用できる。
- (2) ビーム電流が同じの場合、Case 1 のほうが Case 2 よりも Tune depression が小さい。すなわち、エミッタンスが小さいほど Tune depression が小さくなる。
- (3) ビーム電流値を大きくするに従って、ビーム・サイズは Case 1、Case 2 とともに大きくなるが、Case 1 のほうが Case 2 に比べて増加率が大きい。よって、ビーム電流値が大きくなると、Case 1 のビーム・サイズと Case 2 のビーム・サイズの差が小さくなる。
- (4) ビーム電流が同じの場合、エミッタンス・グロースは Case 1 のほうが Case 2 よりも大きく、ビームの端により多くの粒子が存在する。

Matched envelope equation より求めた電流値とビーム・サイズ比の関係を図 3.5 に示す。ビーム電流が 0 の場合、Case 2 のビーム・サイズは横・縦ともに Case 1 の約 1.4 倍であるが、電流値が大きくなるに従ってその差が小さくなり、ビーム電流が 90mA の場合約 1.1 倍である。これは電流値が比較的大きい場合は、エミッタンスを小さくしてもビーム・サイズは必ずしも小さくならないことを示す。

また、図 3.6 の電流値と Tune depression の関係より、Case 1 は Case 2 よりも電流値の増加に対する Tune depression の減少が大きい。さらに図 3.7 の Tune depression とエミッタンス・グロースの関係より、エミッタンス・グロースは Tune depression に依存すると考えられ、0.4 近辺以下では急激にエミッタンス・グロースが大きくなる。

以上により、エミッタンスを小さくしてもビーム電流値と Tune depression によっては、100% ビーム・サイズが小さくならない、あるいは悪化するすることが考えられる。エミッタンス及びビーム電流の仕様を設定する際には、Tune depression を指標の一つにすることが重要と考える。ただし、Tune depression を大きくするために、エミッタンスを大きく設定した場合はビームのモーメントやエネルギー幅が大きくなるのでこれらの影響を考慮する必要があると考える。

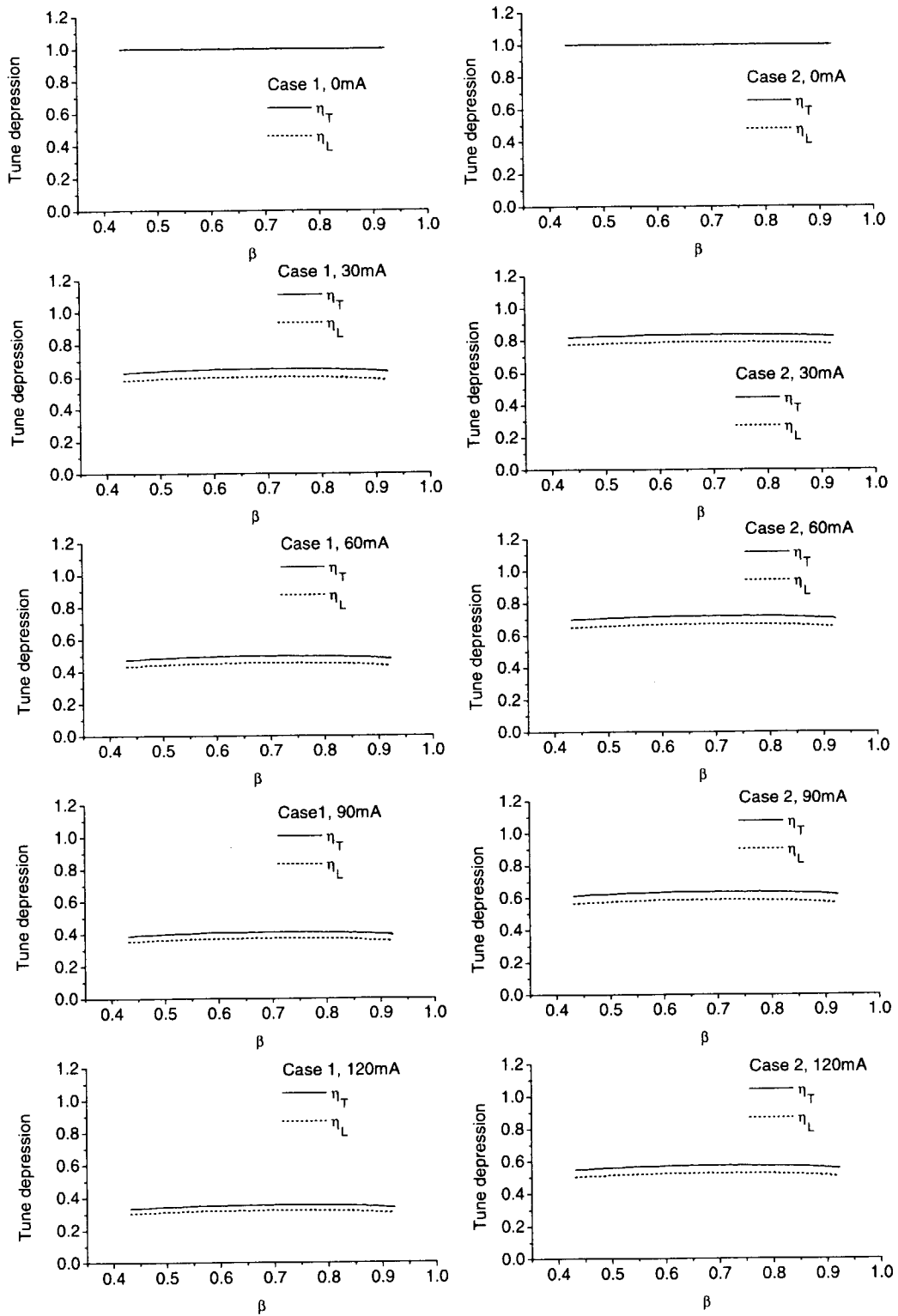


図 3.1 加速粒子光速度比 β と Tune depression

(η_T : Transverse tune depression, η_L : Longitudinal tune depression)

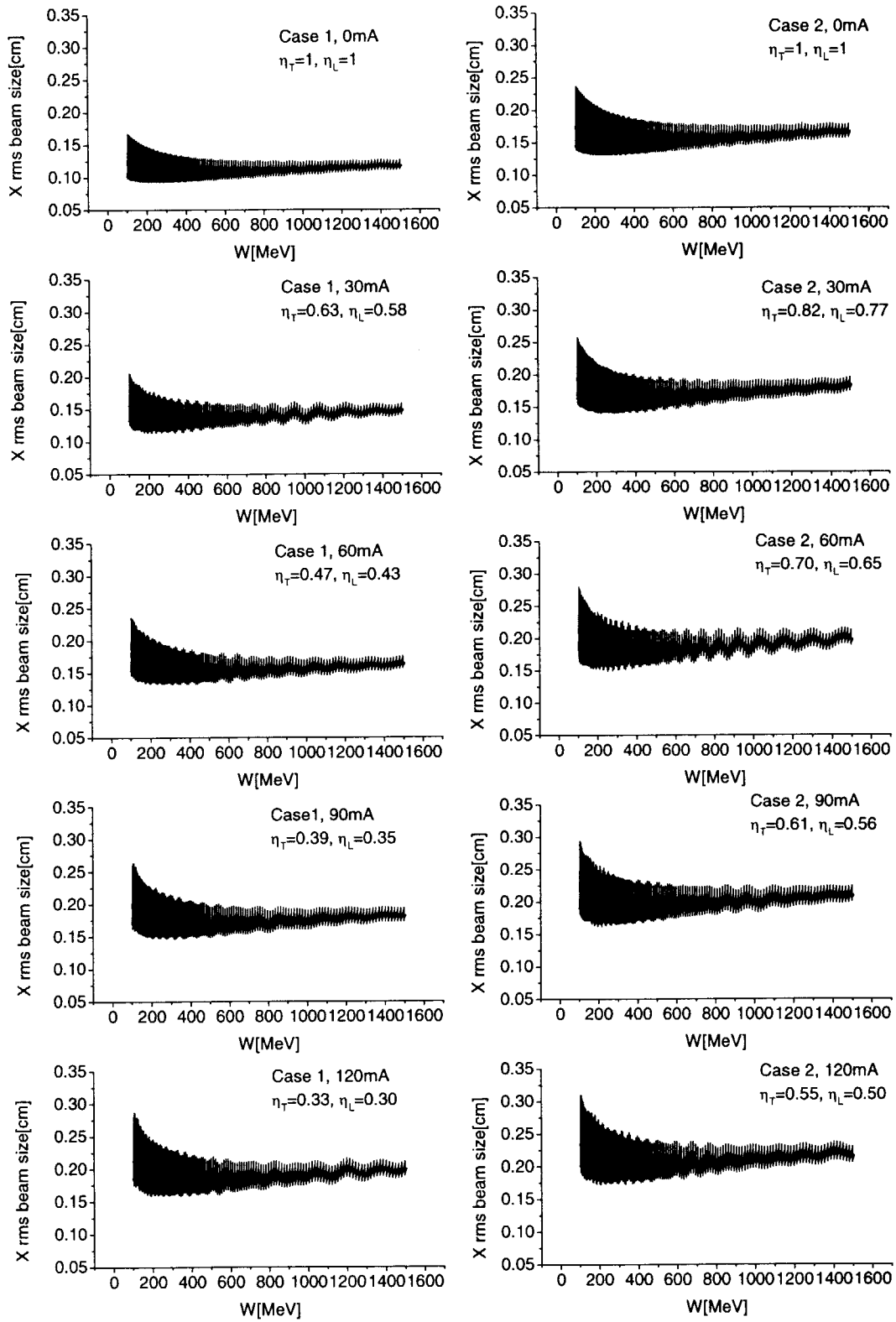


図 3.2.1 加速エネルギーと横(X)rms ビーム・サイズ

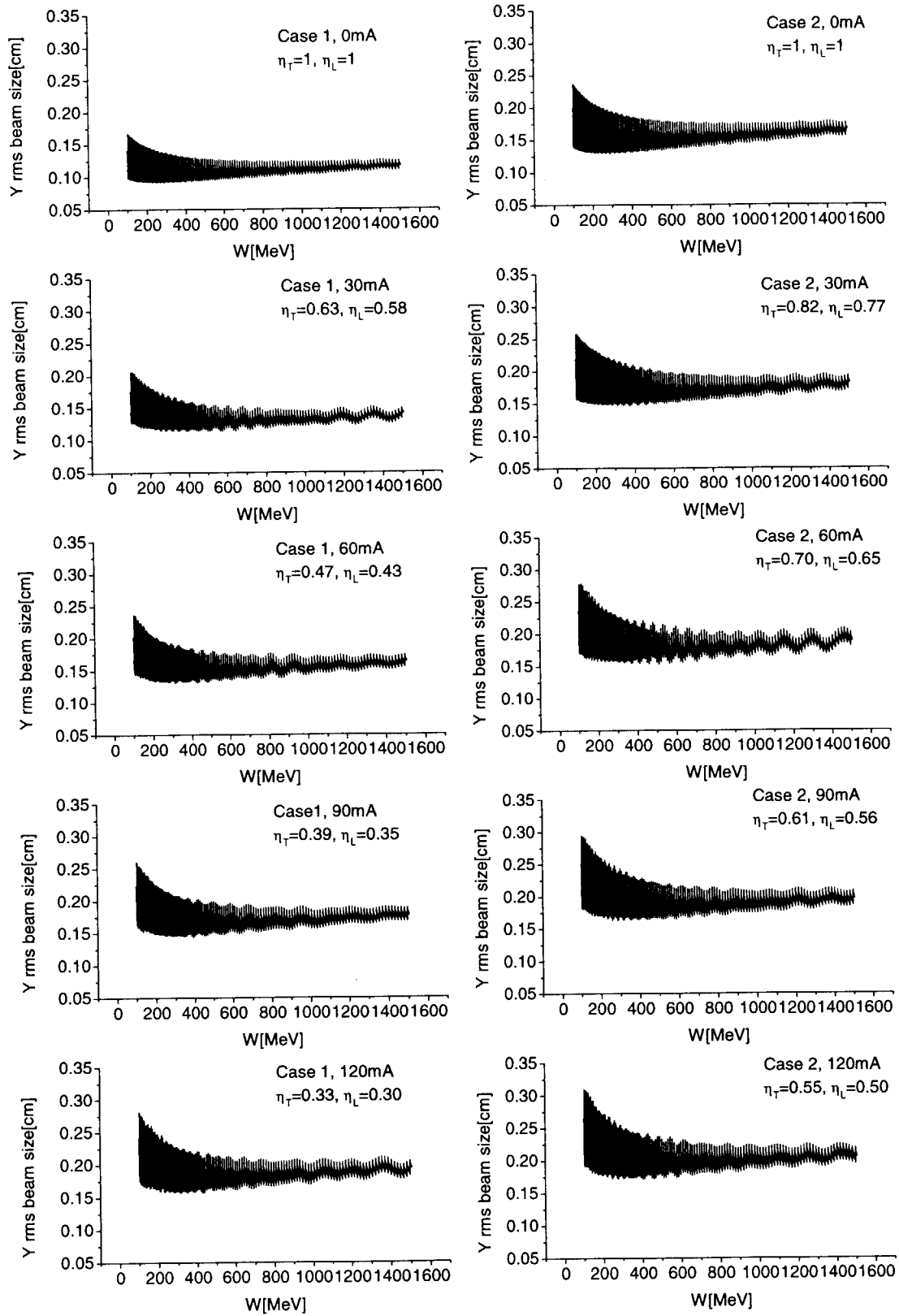


図 3.2.2 加速エネルギーと横(Y)rms ビーム・サイズ

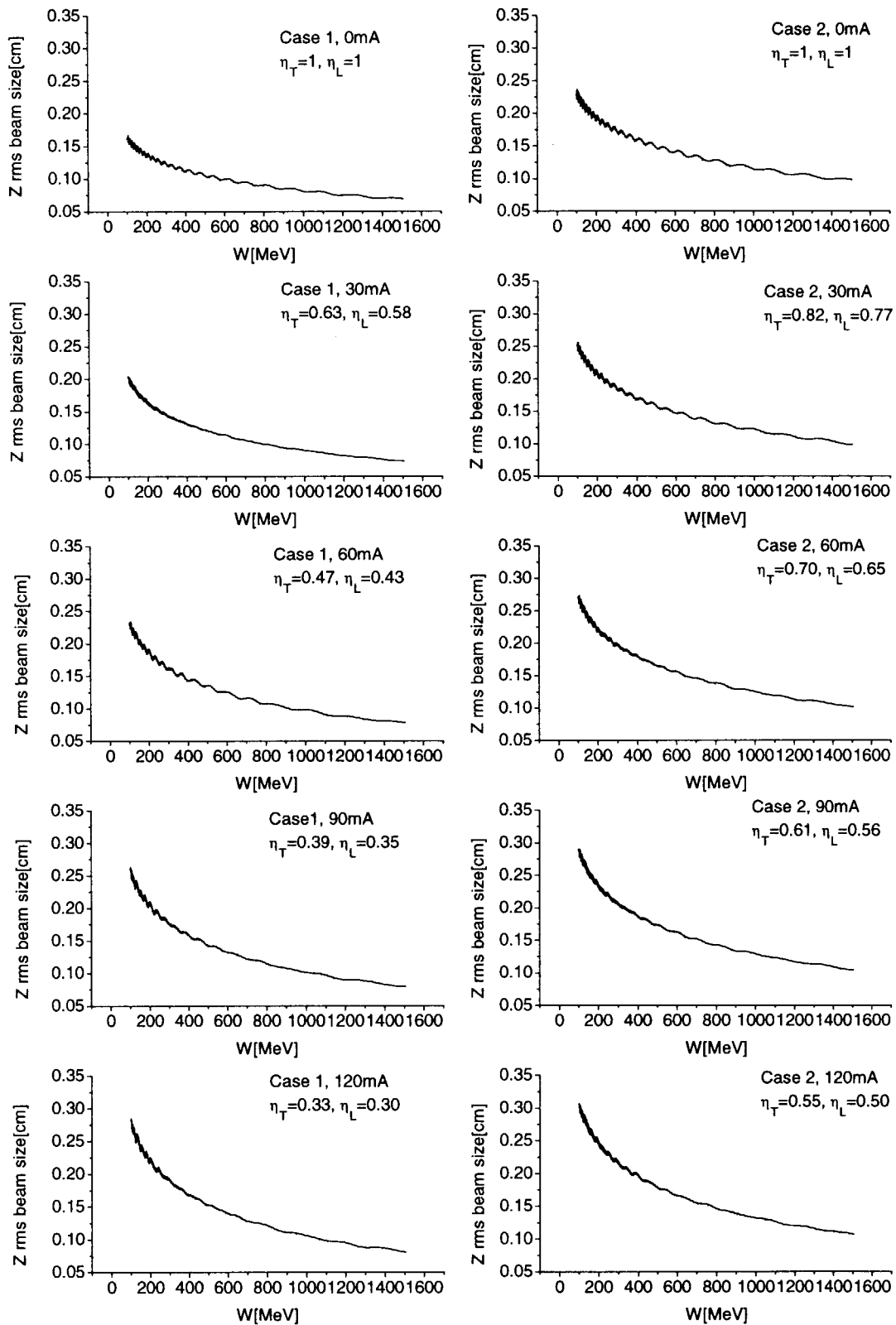


図 3.2.3 加速エネルギーと縦(Z)rms ビーム・サイズ

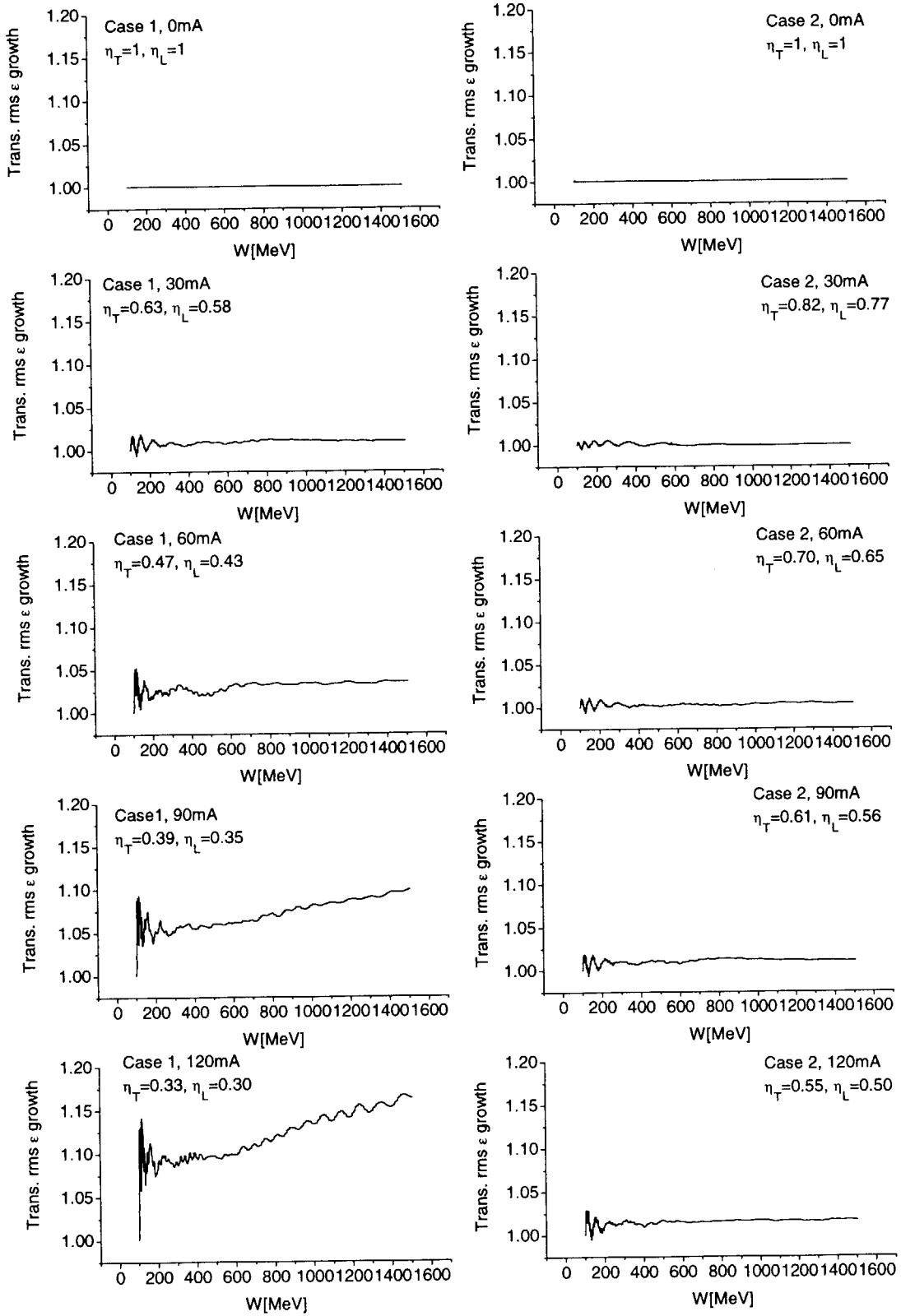


図 3.3.1 加速エネルギーと Transverse rms emittance growth

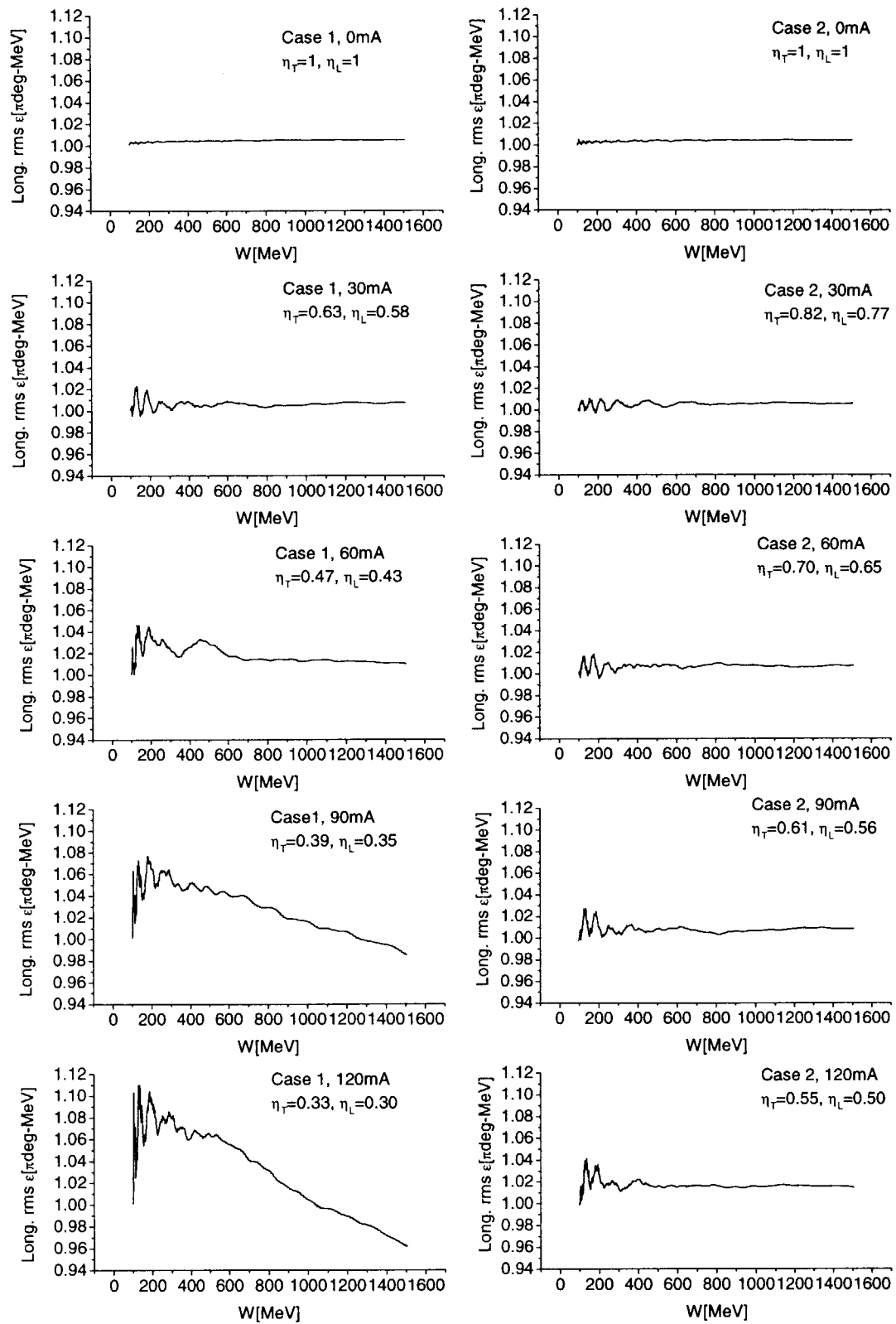


図 3.3.2 加速エネルギーと Longitudinal rms emittance growth

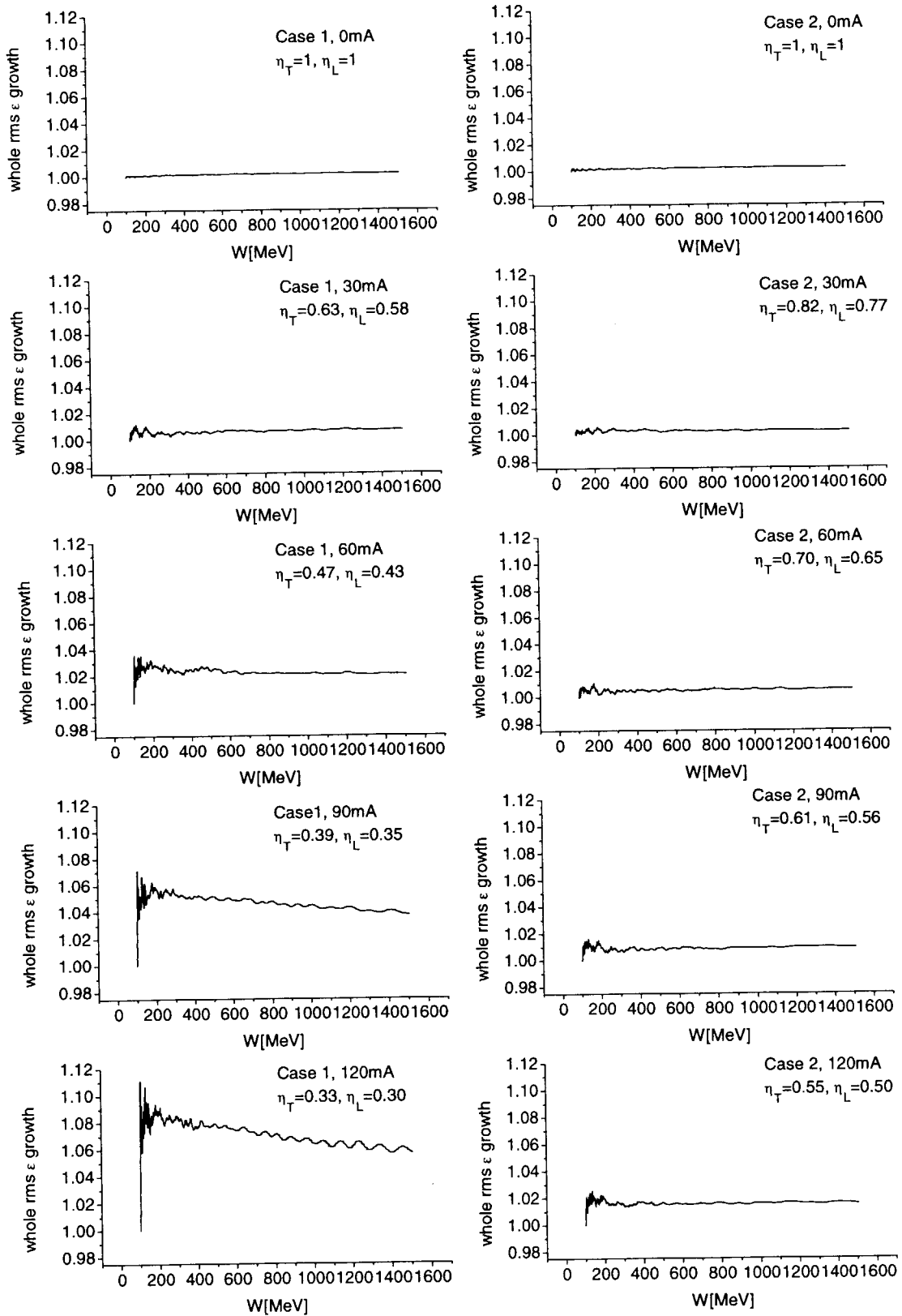


図 3.3.3 加速エネルギーと Whole rms emittance growth

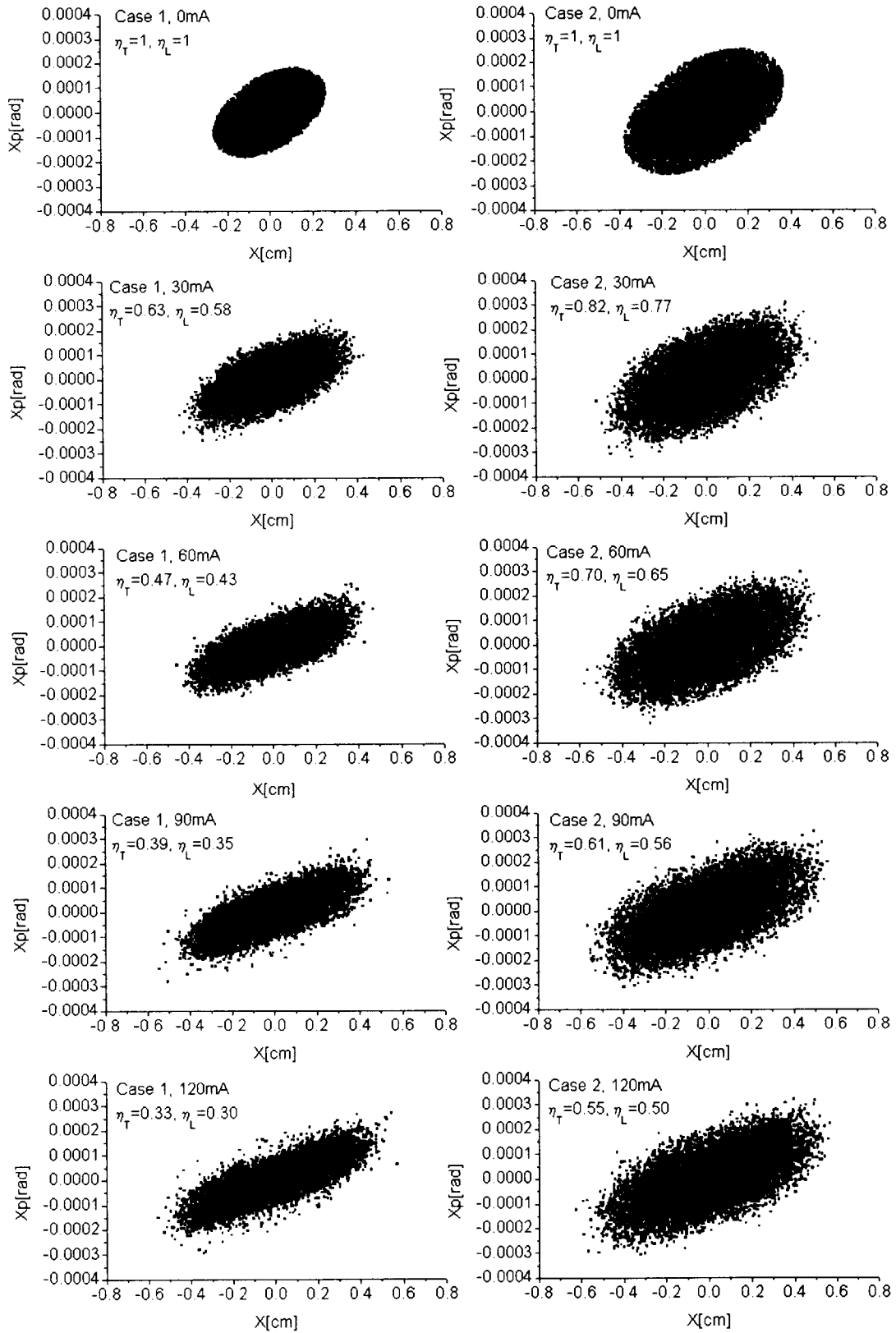


図 3.4.1 出力ビーム位相空間分布(X-Xp)

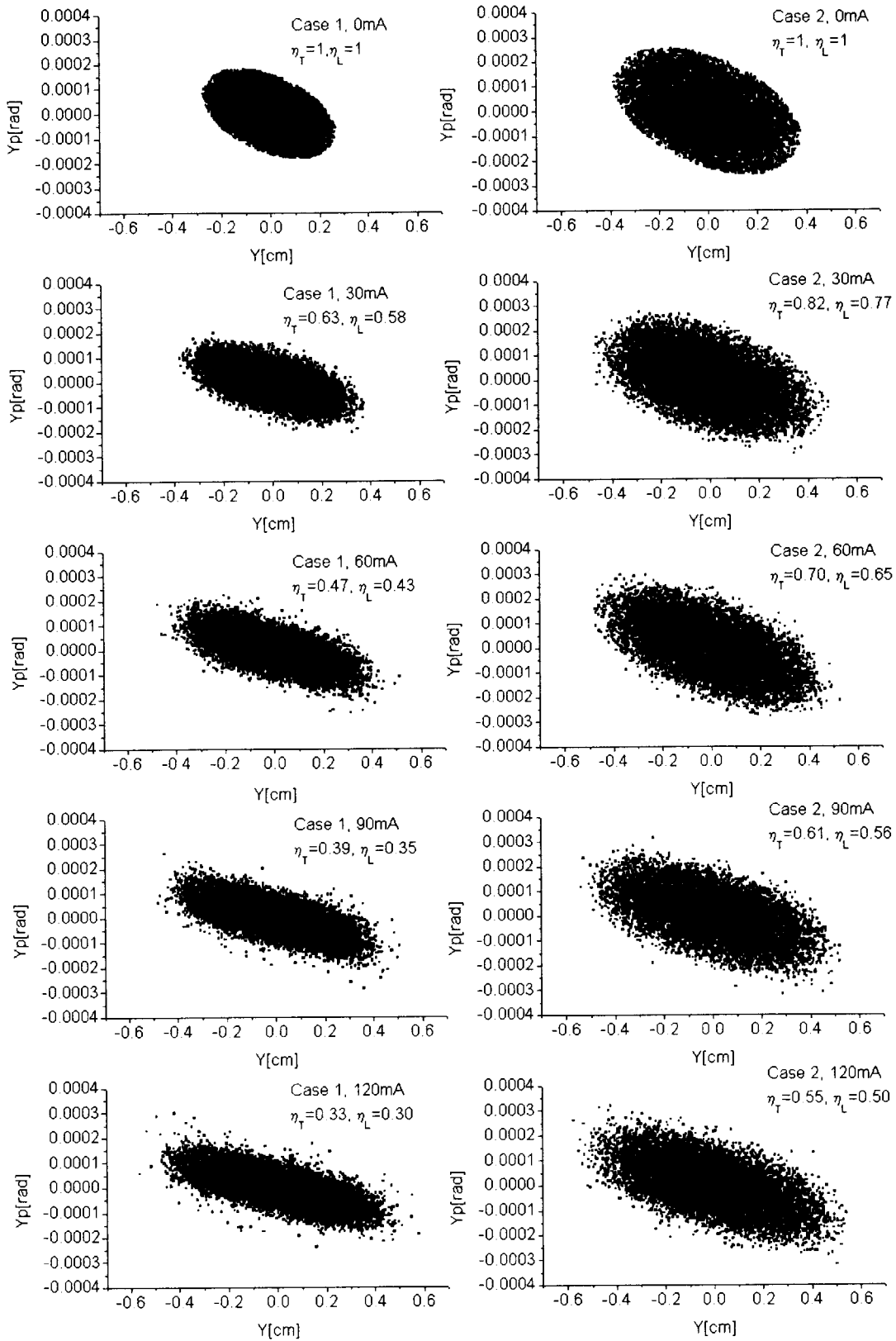


図 3.4.2 出力ビーム位相空間分布(Y-Yp)

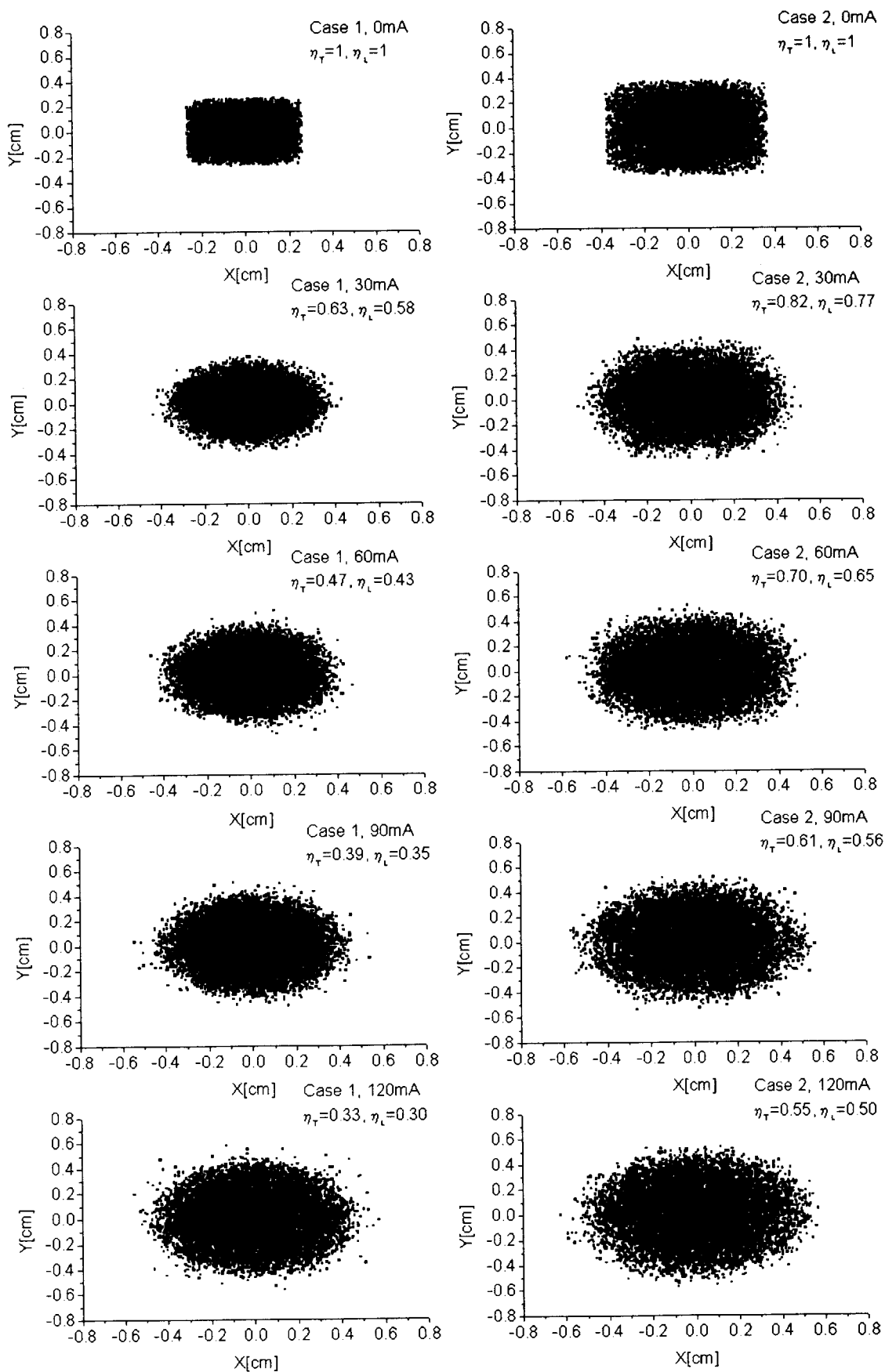


図 3.4.3 出力ビーム実空間分布(X-Y)

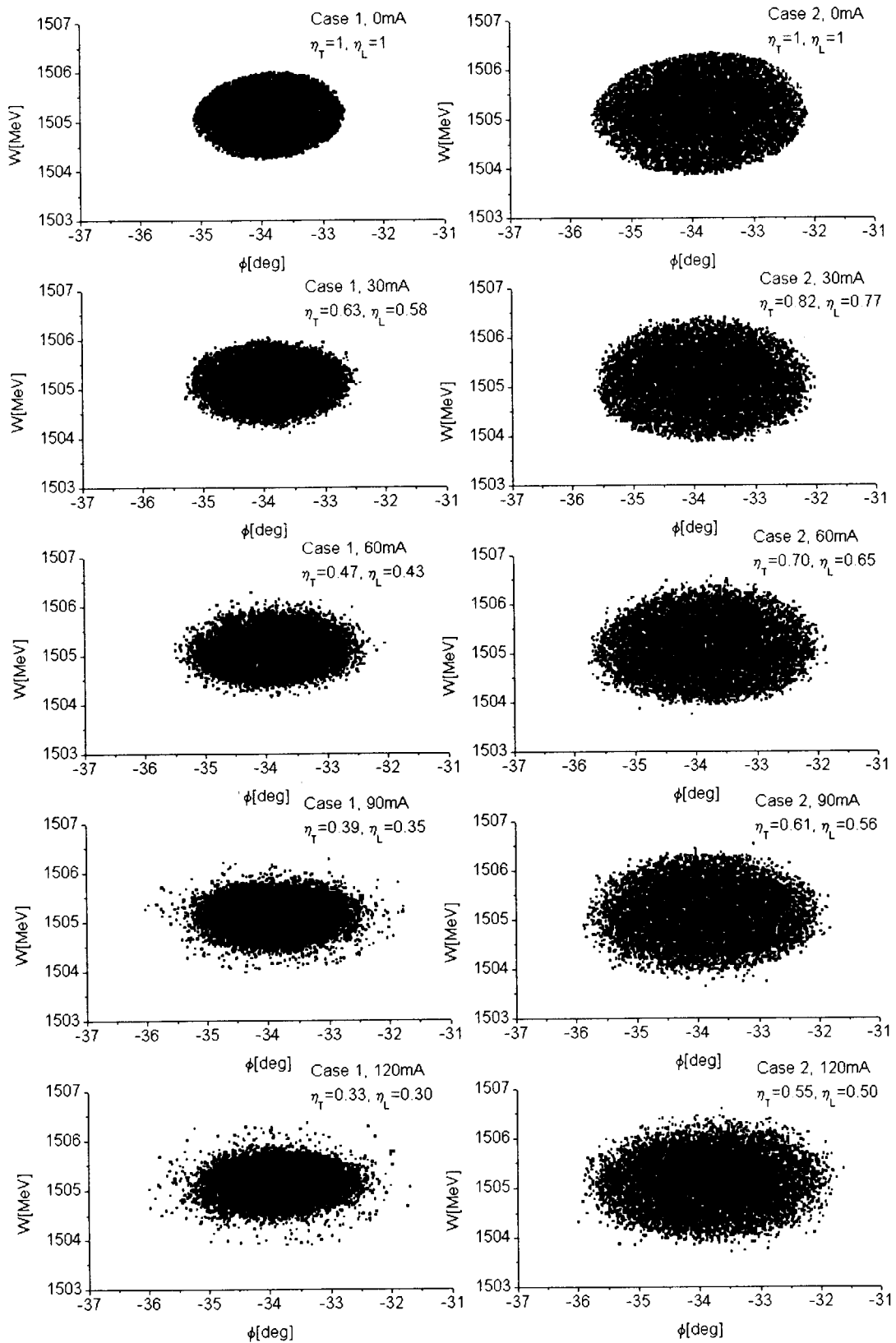


図 3.4.4 出力ビーム位相空間分布(ϕ - W)

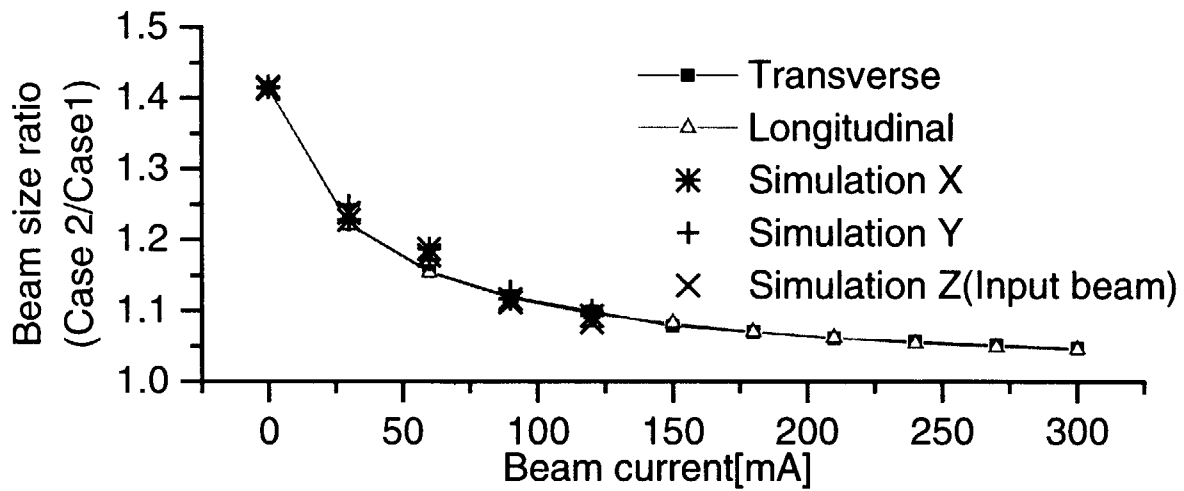


図 3.5 ビーム電流とビーム・サイズ比

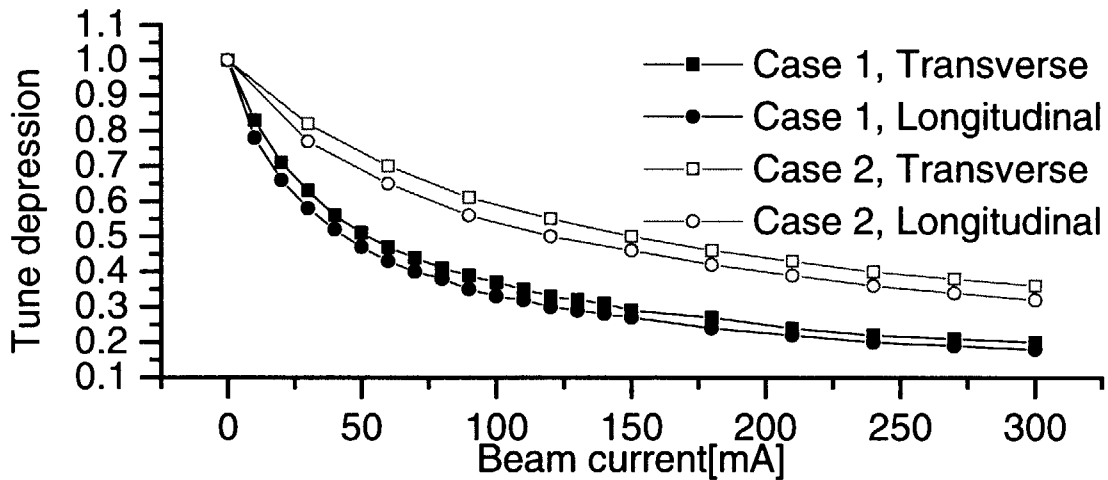


図 3.6 ビーム電流と Tune depression

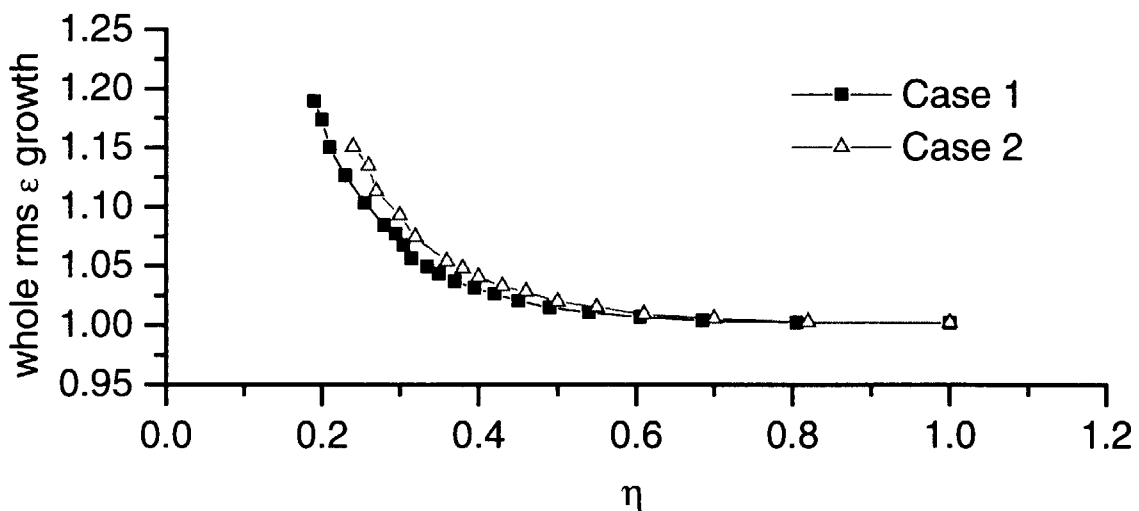


図 3.7 Tune depression と Whole rms emittance growth
(ここでは $\eta=(\eta_T+\eta_L)/2$ とした。)

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射線量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 bar = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS (仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499 W
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

