

Title	小型電子蓄積リングの開発ならびに低エネルギー入射 蓄積実験に関する研究
Author(s)	高田, 博史
Citation	大阪大学, 1989, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2398
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

小型電子蓄積リングの開発ならびに 低エネルギー入射蓄積実験に関する研究

1989年3月

高田博史

小型電子蓄積リングの開発ならびに 低エネルギー入射蓄積実験に関する研究

高田博史

内 容 梗 概

本論文は著者が行った小型電子蓄積リングの開発と低エネルギー入射蓄積実験に 関する研究成果をまとめたものである。

シンクロトロン放射光源は、その応用範囲の広がりに応じて今後は目的指向の光 源として建設されると思われる。なかでも、近年大きな注目を集めているシンクロ トロン放射によるX線リソグラフィは、従来の光源の持つ欠点を画期的に改良しう る新技術であるが、実用上最大の問題点は装置規模が大きいことである。装置の小 型化のためには、電子入射器だけでなく電子蓄積リングの小型化が必須であり、低 エネルギーで入射して大電流蓄積を達成する基礎的研究が急がれている。そこで著 者は低エネルギー入射実験用の小型電子蓄積リングを開発した。総合特性実験では、 高効率入射蓄積および蓄積ビームの寿命を制限する現象に関する研究を行い、各々 の基礎的特性を明らかにした。

本論文は6章より成り立っている。

第1章は緒論であり、シンクロトロン放射光源の小型化の手段について述べると ともに、解決すべき課題を指摘し、本論文の意義を明確にした。

第2章では、X線リソグラフィ光源に要請される小型電子蓄積リングのパラメー タを明らかにし、それに基づく低エネルギー入射小型リングの特徴を出すための設 計方針を示した。更に開発したリングを構成する電磁石系、入射系、高周波加速系、 真空系およびトランスポート系の設計とそれらの基礎特性を明らかにした。

第3章では、低エネルギー蓄積ビームの診断法について述べた。ビームの発生す る電場、磁場あるいはシンクロトロン放射を観測することにより、ビームの情報を 得る種々の計測法について述べ、小型電子蓄積リングのビーム診断に有効な計測法 を開発し、計測システムを構築した。このシステムが、シンクロトロン放射を用い る場合、周囲からくる電気的ノイズの影響を受けにくくかつ計測系を設置するリン グ直線部の短縮を可能にし、小型化に寄与する有用な手法になり得ることを示した。

第4章では、低エネルギーの蓄積ビームの寿命を決める要因を明らかにした。イ オントラッピング現象を観測し、イオン除去のための直流クリアリングが、低エネ ルギービームである程除去に有効であり、イオントラッピングが蓄積ビームの寿命 を制限する要因とはならないことを示した。低エネルギーで重要な Touschek 効果

I

に関し、多重散乱よりもむしろ縦方向バンチ結合不安定性によりビームサイズが増 大し、大電流が得られることを実験的に明らかにした。また、高頻度入射に関し、 従来入射頻度を決めるものと考えられていた放射減衰時間は制約を与えるものでな いことを示した。

第5章では、X線リソグラフィにおける大面積露光のための電子波動特性を検討 し、すべての偏向電磁石からのシンクロトロン放射を同じパターンで変化させると いう同時照射の有効な手法を見い出し、実測結果が計算した波動特性と一致するこ とを明らかにした。

第6章は結論であり、以上の研究で得られた結果をまとめ本論文の総括とした。

目

次

第]	章	Ĺ	緒	論	j	1
			参考	文献		5
第2	章	Î	小型	[電子	著積リングの開発	6
2	2.	1	は	じめ	った	6
2	2.	2	Х	線リ	ソグラフィ光源の特性	7
	2	•	2.	1	要求精度	7
	2	•	2.	2	SR光のパワー密度	7
	2	•	2.	3	ビームサイズ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10
2	2.	3	設	計方	"針	11
2	2.	4	基	本設	計	12
	2	•	4.	1	軌道運動	12
	2	•	4.	2	入射エネルギー	16
	2	•	4.	3	リングの基本構成	18
2	2.	5	入	射系		20
	2	•	5.	1	入射系に対する要請	21
	2	•	5.	2	キッカー電磁石系の設計	24
	2	•	5.	3	光ファイバ磁界センサによる磁場測定	25
				(i)磁界センサの原理と構成	25
				(ii)磁界センサの特性	27
				(iii)キッカー電磁石のパルス磁場測定	28
2	2.	6	電	磁石	系	30
	2	•	6.	1	偏向電磁石のn値	31
	2	•	6.	2	ポールピース形状	33
	2	•	6.	3	偏向電磁石の磁場測定	34
				(i) 測定装置および測定方法	35
				(ii)測定結果	35
	2	•	6.	4	4 極電磁石	37

.

(i) 4 極電磁石の磁場測定	38
(ii) 測定結果	38
2. 6. 5 まとめ	40
2. 7 高周波(RF)加速系	40
2.7.1 RF加速の理論	40
(i) 微小振動の場合	41
(ii) 大振幅振動の場合	42
2. 7. 2 RF加速システム	43
2. 7. 3 空胴特性把握試験	47
(i) 共振周波数の調整	47
(ii) Q値の測定	49
(ⅲ)電界分布の測定	52
(iv)シャントインピーダンスの測定	54
(v)入力インピーダンスの整合調整	56
(vi)他モードの同定	58
2.7.4 空胴の真空状態とパワー投入試験	59
2. 8 真空系	61
2. 8. 1 中性ガス分子による散乱	61
2. 8. 2 ガス放出	62
2. 8. 3 ダクト、排気系構成	63
2. 8. 4 真空特性	66
2. 9 ビームトランスポート系	68
2.9.1 ビームトランスポートライン構成	68
2.9.2 ビームトランスポート試験	71
2.10 むすび	72
参考文献	75

第3章	低	エネルギー蓄積ビームの診断法	78
3. 1	1	はじめに	78
3.2	2	電磁場を用いる蓄積ビーム計測	78

3. 2. 1 ビーム位置モニター	78
(i) 4 極ボタン型モニター(B P M)の設計	79
(ii) 感度校正	81
3. 2. 2 蓄積電流モニター(磁気変調型トランス:DC-CT)	83
(i)測定原理	83
(ii) DC-CTの構成	86
(iii) DC-CTの特性	88
3. 3 SR光を用いる蓄積ビーム計測	89
3. 3. 1 光学パラメータ	90
3. 3. 2 ビームプロファイルモニター	91
(i)TVカメラによるビームスポット観測	91
(ii)フォトダイオードアレイによるビームプロファイルモニター…	91
3. 3. 3 バンチ長モニター	94
3. 3. 4 ベータトロン振動数モニター	95
(i) RF-KO電極	96
(ii)ベータトロン振動数の検出系	98
3. 3. 5 フォトメトリック蓄積電流モニター	99
(i) モニター構成	99
(ii)測定系の雑音特性	100
(ⅲ)電子数計測 ······	101
(iv)相対強度計測	102
3. 4 むすび	103
参考文献	105
第4章 低エネルギー入射蓄積	106
4. 1 はじめに	106

		(ii)蓄積ビームへのイオントラッピング	114
		(ⅲ)イオンの運動	117
4.	3.	2 イオンの蓄積ビームに及ぼす影響	118
		(i)ベータトロン振動数のシフト	118
		(ii)蓄積ビーム寿命の短縮	119
4.	3.	3 イオンクリアリング	119
		(i)dcクリアリング	120
		(ii) r f クリアリング	121
4.	3.	4 イオンクリアリング実験	122
		(i)イオントラッピングの観測	122
		(ⅲ)実験-dcクリアリング効果	123
		(ⅲ)まとめ	127
4.4	蓄	積ビームの寿命	127
4.	4.	1 Touschek寿命 ······	127
4.	4.	2 バンチサイズ	130
		(i) バンチサイズの増大	130
		(ii) 蓄積電流依存性	133
		(ⅲ)電子エネルギー依存性	134
		(iv) r f 加速電圧依存性	135
4.	4.	3 蓄積ビーム寿命の評価	136
		(i) 蓄積電流減衰率の測定	136
		(ü)Touschek寿命の評価	139
		(ⅲ)まとめ	141
4.	4.	4 低エネルギーに起因する減衰増大機構	142
		(i)実験的検討(I)	142
		(ⅲ)実験的検討(Ⅱ)	145
4.5	盲	·頻度入射 ······	147
4.	5.	1 入射エネルギーとベータトロン振動の減衰時間	147
4.	5.	2 入射頻度の上昇効果	148
		(i)実験方法と実験結果	149

(ⅲ)実験結果の検討 ・	
(ⅲ)まとめ	
4.6 むすび	
参考文献	
第5章 大面積露光法	
5. 1 はじめに	
5. 2 電子波動特性	
5. 3 許容ビームサイズ	
5. 4 小型電子波動リング	
5. 4. 1 ベータトロン振動数(友存性
5. 4. 2 電子波動実験	
(i)実験装置と方法 ・	
(ii)実験結果	
(ⅲ)電子波動の蓄積ビー	- ムへの影響
5.5 むすび	170
参考文献	
第6章 結 論	
謝 辞	
業績目録	
付 録	

第1章緒 論

1.1 はじめに

高エネルギー電子が円運動する時に放出するシンクロトロン放射(synchrotron radiation,SR)は、赤外からX線にわたる強力な連続光である。特に、十分な強度を有する光 源のなかった真空紫外およびX線領域でSR光を利用した画期的な研究が続出した。SR 光が実用化されたのは、1960年代であり、研究は電子シンクロトロンに寄生して開始され た。1970年代に入り本格的な利用は、強度および安定性に優れた電子蓄積リングの登場 によって始まったと言える。ただし、これらのリングは衝突用リングである。SR光によ る研究の成果が物理学のみならず自然科学の全分野に波及するにおよび1970年代後半から 1980年代前半にかけてSR光専用の電子蓄積リングの建設が世界各国で始められた。その はしりがSOR-RING¹⁾(東大物性研、 0.4MeV、1975)であり、続いて日本では TERAS²) (電総研、 0.8MeV、1981)、フォトン・ファクトリー³⁾ (高エネルギー 研、2.5 GeV、1982) UVSOR⁴) (分子研、0.6 MeV、1983) の3台の光源が完成し た。一方、外国での最初の専用光源は英国ダースベリの SRS⁵) (2GeV、1981) であ り、その後ドイツベルリンのBESSY⁶)(0.8GeV)、アメリカブルックヘブンのNS LS⁷⁾(0.75 GeV、2.5GeV)、ウィスコンシンの Aladdin⁸⁾ (1GeV)が建設され た。また、既存の衝突リングを転用して専用光源としたものも多い。電子蓄電リングは主 に円形あるいはレーストラック状のドーナッツチェンバーとこのチェンバーを外側から挟 んで偏向および収束のための磁場を発生する電磁石群とからなる。10⁻¹⁰Torr のオーダ ーの超高真空に排気されたチェンバー内に電子入射器から入射される電子ビームは、セプ タムおよびキッカーとそれぞれ呼ばれるパルス電磁石によって偏向され、チェンバー内の 中心軌道に沿って周回する蓄積ビームとなる。電子ー電子相互作用、中性ガス分子との散 乱ならびにトラップイオンなどによって定まる寿命の間、電子は周回を続けながらSR光 を放射する。電子エネルギーの損失は高周波加速空胴に共振させた高周波電場によって補 われる。

SR光源の動向を見ると、今後益々光源の需要が多くなるとともに、その目的、用途、 要求が多方面にわたることは明らかである。

一つの流れは、より高輝度、短波長光源⁹⁾としての特長を最大限に生かすために、ビームの質(エミッタンス)の向上に重点を置いた大型光源の実現であり、他方は、汎用装置

として手軽に利用しうる小型光源の実現である。¹⁰⁾¹¹⁾とりわけSR光が次世代のX線 リソグラフィに有効であることが立証¹²⁾⁻¹⁴⁾されたので、製造ラインに組み込める規模 でかつ経済性に優れたX線リソグラフィ用小型光源を当面のターゲットとして開発するこ とは、実用的あるいは工業的意義がきわめて大きく、産業界において強く望まれていると ころである。

したがって、本論文はX線リソグラフィ用小型光源を実用化するために必要な技術を確 立することを目標とした研究を対象とした。

1.2 実用化のための手段

X線リソグラフィ用小型光源を実現するには、電子ビームを入射する電子入射器の小型 化と高エネルギー電子を蓄積する電子蓄積リングの小型化が不可欠である。また、SR光 は水平方向には十分広い露光幅をつくれるが垂直方向の露光領域は狭い。従って、この欠 点を補い露光領域の拡大を計るため光源側で対応しうる手段を考えることも必要である。 実用化のための手段を示す。

- ① 電子入射器の小型化 ……… 低エネルギー入射、電子入射の高効率化
- ② 電子蓄積リングの小型化 … 高磁場化による偏向半径の低減、直線部分の短縮
- ③ 露光領域の拡大 ……… 電子波動法

1.3 実用化技術に関する研究課題

前節で説明した手段を実用可能な技術とするためには、ハードウェアとソフトウェアの 両面から、多くの解決しなければならない研究課題がある。

以下、表 1.3-1 に研究課題を系統的に分類して、本論文で扱う未解決の問題点を抽出 する。

	手 段		研	究	課	題	
	低エネルギー入射	1.	既存の多くのう を入射して100 MeV程度以下で	と源では、29 mA以上の で大電流が	50MeV以上 の蓄積電流 得られるか	のエネルギーの電 を得ているが、 <u>1</u> が課題である。	子 50
電		▫.	このため、大電 要因である <u>Tou</u>	電流での蓄 ^対 schek効果	情ビーム寿 による寿命	命を決定する一つ を <u>増大する対策</u> も	つの o必
1 f			要とされる。				
入		ハ.	入射エネルギ- 不安定性が顕著	-の低減に、 皆になると	より、 <u>蓄積</u> 考えられる:	ビームのロスを招 が、不安定性の房	く因
射			の解明と対策な	が必要であ	る。		
器	電子入射の 高効率化	イ.	電子蓄積リング	ゲへの電子(動の減衰時)	の入射頻度	を決めているのは 低エネルギー入身	tべ tで
Ø			ある程減衰時間	間も長くかれている	かり、大電	流蓄積という点で 解決が必要である	好
小							
型		□.	上記の問題に対 <u>プローチ</u> も必要	付して、 <u>入</u> 要であろう。	<u>射頻度の上</u> 。 。	昇という面からの	<u>)7</u>
化		ハ.	入射頻度の低 る。大電流を打 ある電子リニン ネルギースペク	下を補うに 加速できる: アックビー: クトル幅圧;	は電子入射 が、数%の ムの質の向 縮装置を開	の高効率化が望ま エネルギー拡がり 上が図れる小型の 発する必要がある	ミれ)のエ う。

表1.3-1 実用化技術に関する研究課題

	手 段			研	究	課	題	
	高磁場化による 偏向半径の低減	イ.	超電導 小さく となる	電磁石を用 することに が、これを	いて磁場 より、磁 低減する	島強度を大 弦場の非線 対策が必	きくして的 形成分の ^は 要となる。	曲率半径を 曽加が顕著
電子		□.	必要と ードを	される磁場 用いなけれ	配位を得 ばならな	見るために い。	は三次元石	兹場解析コ
著		ハ.	曲率を る。	有する形状	のコイル	>巻き技術	の開発が。	必要とされ
積 リ		二 .	要求さ 差 0.1 がある	れる磁場精 mm以下で 。	度△ B ∕ ≦電磁石を	´B~10⁻⁴ と製作する	を実現す 技術を開発	るために公 発する必要
ン		朩.	電磁力 法の開	による撓み 発が必要。	を 0.1m	nm以下に	収めるコイ	イル支持方
グの		^.	リング 計、製	の超高真空 作も研究課	系と共存 題である	ずし得るク ら。	ライオス	タットの設
小 型	直線部分の短縮	イ.	収束電 <u>偏向電</u> するこ	磁石類の直 磁石に収束 とが望まれ	[線部分カ <u>〔機能を</u> 持 しる。	、占めるス、 身たせるこ	ペースが、 とにより、	大きいため、 これを低減
化			<u>ビーム</u> なる。	診断に不可	「欠なモニ	- ターを選	別するこ。	<u>と</u> が必要と
		ハ.	電磁誘 <u>るビー</u> る。	導による語 ム診断法カ	見差をなく 「効果的で	、する面か であり、そ	らも、 <u>S</u>] の研究が。	<u>R 光を用い</u> 必要であ
露光領域の	電子波動法	イ.	SR光 が要ユ ビーチ も	の縦方向の される。電 ラインのJ 必要である)露光領域 「子波動活 「型化との い。	域は狭いの 長の適用が の両立性と	で、露光住最も効果自いう面かり	頃域の拡大 りであるが らのアプロ
の拡大		□.	電子波 <u>で同時</u> ことが	動法の利点 に大面積露 必要である	えを生かし またができ	ノ、かつす きる電子波	<u>べてのビ・</u> 動リング	ームライン を開発する

表1.3 -1 において、アンダーラインを施した研究課題が本論文で扱った項目である。 これらの諸課題に挑戦して、次世代のX線リソグラフィ用小型光源の技術基盤を確立し、 その実用化に寄与することを本研究の目的とした。

-4-

参考文献

- 1) T. Miyahara et. al., Particle Accelerators 7, 163 (1976).
- 2) T. Tomimasu et. al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-30, 4, 3133 (1983).
- 3) H. Huke et. al., ibid, NS-30, 40, 3130 (1983).
- 4) T.Kasuga et. al., ibid, NS-32, 5, 3409 (1985).
- 5) D. J. Thompson, Nucl. Instrum. Method. 177, 27 (1980).
- 6) D. Einfeld and G. Mülhaupt, Nucl. Instrum. Method. 172, 55 (1980).
- 7) M.R. Howells, ibid, 195, 17 (1982).
- 8) A. L. Robinson, Science 231, 546 (1986).
- 9) T. Mitsui, Nucl. Instrum. Method. A246, 1 (1986).
- 10) 富增多喜夫,真空,29(7),299(1986).
- 11) 冨増多喜夫, 電学誌, 106 (9), 15 (1986).
- 12) E. Spiller et. al., J. Appl. Phys. 47, 5450 (1976).
- 13) H. Aritome et. al., J. Vac. Sci. Technol. 15, 992 (1978).
- 14) K. Hoh et. al., Jpn. J. Appl. Phys. 22, 765 (1983).

シンクロトロン放射に関するその他の参考文献

- i) H. Winich and S. Doniach, ed., Synchrotron Radiation Research (Plenum Press, New York, 1980)
- ii) 日本物理学会編,シンクロトロン放射(培風館, 1986).

- 5 -

第2章 小型電子蓄積リングの開発

2.1 はじめに

X線リソグラフィ用に、超電導電磁石を適用して小型でかつ経済的な小型電子蓄積リン グを開発しようとする試みは、1980~1981年に西独のミュンヘン工科大学で開始された。¹¹ この設計案をもとにして、1983年に、Berlin Electron Synchrotron (BESSY)が中 心となって単体超電導電磁石よりなる直径 3m以下のCOSYとよばれるリングに、電子 エネルギー50keVで入射し、ベータトロン加速で10MeVまで上げ、その後シンクロトロン 加速して、蓄積エネルギー 560 MeVのビームを蓄積するという計画²¹を推進してきた。 しかしながら、この第1案の計画は技術的困難性が明らかとなり中止された。第2案の超 電導レーストラック型リング³¹に関してもそれまで公表した計画を何度も繰り延べながら 第3案として、入射試験用にまず常電導リングを開発した後、これを超電導電磁石に置き 換えるという決定がなされた。常電導リングを用いた入射実験では、50MeV入射により、 1986年 4月に最初のビーム蓄積に成功したが、リソグラフィに必要なレベルの大電流蓄積 を達成していないのが現状である。⁴¹

一方、わが国における超電導小型電子蓄積リングの開発計画は三つのグループから発表 されている。すなわち当社(住友電工)、^{5) 6)} NTT、⁷⁾ 住友重機⁸⁾ のプロジェクトであ る。

筆者は、開発に携わった当初(1984)から、超電導電磁石そのものに開発すべき要素を多 く含むこと、ならびに偏向電磁石の超電導化のみでは小型光源が実現できないとの理由か ら、電子入射器の小型化のための低エネルギー入射実験を主眼とした常電導小型電子蓄積 リング(NIJI-I)の開発⁹⁾と超電導小型電子蓄積リングの開発を並行して推進して 行くことを考えた。低エネルギー入射実験のために用いる小型リングは1984年夏から電総 研の技術指導の下に設計研究を実施し、1985年4月から建設をスタートしてその年の末に リングとしての完成をみた。

本章では超電導小型電子蓄積リングに要求されるリングパラメータを明らかにし、それ を満たすような低エネルギー入射小型リングの設計方針を示す。また、低エネルギー入射 実験用の小型リングとしてトータルシステムと複数のサブシステムとが一つの設計思想で 統一され、各々のサブシステムがその機能を十分に発揮することが重要であるため、サブ システムの典型的なデータの把握に努めた。次節2.2 ではX線リソグラフィ用小型光源に 要請される必要性能について、 2.3~2.4 節ではリングの設計方針と基本設計について述 べる。 2.5~2.9 節ではサブシステムである入射系、電磁石系、高周波加速系、真空系、 ビームトランスポート系の設計および基礎特性を明確にすることを研究の目的とした。

2.2 X線リソグラフィ光源の特性

2.2.1 要求精度

クオーターミクロン半導体素子のリソグラフィ工程に実用上要求される仕様を条件的に は厳しい表2.2 -1 のように設定する。SR光をリソグラフィ光源として用いるためには、 表2.2-1 SRリソグラフィの要求仕様

分解能	0. 2 5 μm
総合重ね合わせ精度	0. 05μm
半影ぼけ	0. 025μm
ウェハーサイズ	8インチ
露光面積(最大)	$5 0 \text{ mm} \times 5 0 \text{ mm}$
スループット	4 0枚ウェハー/ヒームライン・時間以上

主にX線波長領域とビームサイズによって決まる分解能が重要な判定基準となる。使用波 長領域は、X線が波であることにより生じるフレネル回折によるぼけ ℓ_D と、入射X線の エネルギーに依存するレジストからの二次電子の飛程によるぼけ R_g およびマスクとレジ スト面との距離(プロキシミティギャップ)Gによって決定される。これらの関係を図2. 2 -1 に示す。従って、最適なX線波長領域が存在することになる。一方、ビームおよび Gが有限の大きさを持つために生じる半影ぼけは、光源とマスク間の距離Lとの関係によ り決定される。以下、表2.2 -1 の要求精度を満たす光源特性について考察する。

2.2.2 SR光のパワー密度

SR光が、レジスト面上に所定のパワー密度以上で到達するまでに、真空遮断窓(Be 窓)、マスク温度制御のためのHe ガスおよびマスク基板を透過することにより、透過した物質の線吸収係数とその厚さにより減衰を受ける。この時のレジスト面上のパワー密



図2.2-1 フレネル回折で決まる最小線幅ℓ_D と二次電子飛程R_gのX線波長依存 性

度は

$$J = \int_{0}^{\infty} P_{o}(\lambda) \exp \{-\mu_{w}(\lambda) t_{w} - \mu_{g}(\lambda) t_{g} - \mu_{m}(\lambda) t_{m} \} d\lambda$$
(2.2-1.)

で示される。ここで、 $P_{\circ}(\lambda)$ はSR光の電子軌道面上におけるパワースペクトル、 μ および t は、各物質の線吸収係数、厚みであり添文字w、g、mはそれぞれBe 窓、He ガス、マスク基板を表す。 $P_{\circ}(\lambda)$ は、理論的に

$$P_{\circ}(\lambda) = 1.562 \times \frac{E^{\tau}}{\rho^{2}} \left(\frac{\lambda_{c}}{\lambda}\right)^{3} \times \int_{(\lambda_{c}/\lambda)}^{\infty} K_{5/3}(\eta) d\eta \frac{mW}{\lambda \cdot mA \cdot mrad} \qquad (2.2-2)$$

と表される。²、ここで、E、 ρ 、 λ 。はそれぞれ電子エネルギー、偏向電磁石の偏向半径、 臨界波長である。K_{5/3}は第二種の変形ベッセル関数である。

高真空ビームラインと露光室とを分離する真空遮断窓として用いるBe は、単に真空遮断だけでなく~15Å以上の波長をカットする短波長フィルターとしての働きもする。マスク基板材としては、BN膜が、Si₃N₄、SiO₂、A ℓ_2 O₃に比してSR光の透過性が良く最も有望な材料であるが、現段階において、膜としての強度の安定性が十分でない

- 8 -

という欠点を有する。³⁾ マスク温度制御用ガスとしては、SR光の透過率、熱伝導率およ び取扱い易さの点でHe ガスが最も優れている。しかもBe 窓を透過した15Å以下の短波 長成分はHe ガス中での線吸収係数が極めて小さいため、He ガスによるエネルギー吸収 はないものと考える。一方、露光面積は、第5章で述べる電子波動法によりーステップ当 りウエハー面50mm×50mmに一括露光するとすれば、 8インチウエハーではステップ回 数はN=16となる。アライナーの目標性能を、ウエハー取換え時間 Toverhead=10秒、ス テップ移動時間 T_{step}= 2秒、位置合わせ時間T_{align}= 1秒として、スループットWを40 枚/ビ-ムライン・時間以上得るための露光時間T_{exp}は次式により計算され、T_{exp}は2秒以下と なる。

$$W \ge \frac{3600}{T_{overhead} + N(T_{exp} + T_{step} + T_{align})}$$
(2.2-3)

次に、この露光時間よりレジスト面上で要求されるパワー密度を求めることができる。 レジスト材は鋭意開発が進められており、性能の向上が図られてゆくと考えられるが、現 時点で研究に供試されているレジスト⁴⁾に余裕をみて、感度 100mJ/cm² とする。よ って、レジスト面上でのパワー強度は50mW/cm² 以上必要となる。ここでは、超電導 偏向電磁石を用いた小型電子蓄積リングを対象とする。図2.2 -1 の分解能限界および窓 材による波長吸収特性を考慮して、リソグラフィに有効な波長領域を 4~15Åに選んだ。 小型電子波動リングに要求されるSR光のパワー密度J (mW/mA・mrad)の計算に 用いたリソグラフィシステムのパラメータを表2.2 -2 に示す。

偏向電磁石の磁束密度 B(T)、偏向半径 ρ (m)、電子エネルギーE(GeV)および ピーク波長 λ_{p} (Å)の関係は

- $E^{3} = 2.348 \times \rho \swarrow \lambda_{p} \qquad (2.2-4)$
- B = $10 E / 3\rho$ (2.2-5)

で求められる。Bを(a)4.0T、(b)4.5Tとした場合のE、ρおよび表2.2 -2 のパラメー タより(2.2 -1)式で計算されるレジスト面上のJのλ。依存性を図2.2 -2 に示す。

以上より、50mm×50mmの露光面積当り 1.25 Wのパワーが要求され、ビームライン 長を 7mとすれば 175mW/mrad となる。図2.2 -2 より、実用機としての小型電子波



表2.2-2 リソグラフィシステムの計算パラメータ



動リングの λ , を 4.2Å、Bを4.5 TとすればE~0.64GeV、 ρ = 0.48m、J~0.8 mW /mA・mrad となり、蓄積電流 I~220 mAが必要であることがわかる。ビームライ ン長を更に短くすることができれば、必要とされる蓄積電流を低減することが可能となる が、ビームサイズに起因する半影ぼけが問題となってくる。

2.2.3 ビームサイズ

クオーターミクロンデバイスのパターン転写後の解像線幅の均一性は工業的に重要なフ ァクターであり、光源およびリソグラフィ技術の双方より決まるものである。従って、リ ソグラフィ技術の今後の開発に負う所が大であるが、現状の紫外線露光による量産技術で は解像線幅の均一性が±10%で実施されているので、X線リソグラフィにおいても総合重 ね合わせ精度として0.05μm程度とすることが望ましい。それ故、光源としては±5%、 リソグラフィ技術で± 5%を目標にすることが妥当と考えられる。

光源から決まる解像度については、X線リソグラフィにおいてすでに論じられていると おり、転写は光学素子を介在させない密着あるいは近接焼き付けであるので、半影ぼけが 解像度の要因となる。半影ぼけるは、図2.2 -3 に示すようにマスクとウエハーの間に空 隙Gがあること、光源が有限の実ビームサイズ 6 σ を持つことにより生じるものでG=15 μ m、ビームラインの小型化を考慮して光源一マスク間距離L=4~7mとし、 δ を0.025 μ m以下に抑えるためには、 $\sigma \leq 1.1-1.9$ mmとすることが必要である。

電子波動法による蓄積ビーム波動特性を考慮した許容ビームサイズについては、第5章 5.3節で述べる。



図2.2-3 SRリソグラフィにおける半影ぼけモデル

2.3 設計方針

NIJI-Iは低エネルギー入射研究用のリングであるとともに、超電導小型電子蓄積 リングを開発するためのプロトタイプとして設計を考える必要がある。

電子蓄積リングの小型化を追求した場合、NBS SURFII¹¹のように直線部のない 円形の単一電磁石型のリングとなるが、超電導化に際して入射、加速、蓄積さらには保守 性などの諸特性を考えると疑問が残る。リングの必要最小限の構成要素は、偏向電磁石お よび収束電磁石のほかには、SR光によるエネルギー損失を補償するためのrf加速空胴、 電子を加速器から入射するためのセプタムとキッカー電磁石および真空機器である。低エ ネルギー入射であることによって、セプタムとキッカー電磁石は小型化できる。さらに収 束電磁石を小型にするためには、偏向電磁石が収束力を受けもつようにすればよい。

ラティスの選択にあたっては、収束電磁石の数が少なくてすみ、リング全体をコンパク トに作ることができるもので、かつ低エネルギー電子を入射し蓄積しやすいものを得るよ



うにする。図2.3 -1 にFODO型のラティスと偏向電磁石の両側に収束電磁石のダブレ ットを置いたラティスのベータトロン関数の概念図を示す。ダブレットを置く場合には、 偏向部でビームサイズを小さくすることは可能であるが、ビームの体積が小さくなること に伴う電子一電子相互作用(Touschek 効果²⁾)により寿命が短くなる。さらには収束電磁 石の中でベータトロン関数が大きくなるためベータトロン振動数のシフトが大きくなる。 これを打ち消すには6極電磁石を入れる必要があり、必然的に磁界の非線形要素が多く持 ち込まれることになり、非線形要素に起因するベータトロン振動の共鳴現象のために電子 の運動の安定領域が狭くなる傾向になる。一方、FODO型では、偏向電磁石の中でβ_x が非対称でありビームサイズは小さくならないが、リソグラフィに要求される許容ビーム サイズ以下とすることは容易であり、収束電磁石の数が少なくてよいので、直線部長の短 縮がはかられ、かつTouscheck 効果を緩和することができる。以上より、決定した設計方 針は、

- ② 偏向電磁石にエッジ収束力を合わせ持たせる。
- ラティスはFODO型を基本とする。

である。

2.4 基本設計

2.4.1 軌道運動

電子蓄積リングでは、中心のエネルギーEから△Eずれた電子も周回しており、電磁石 のリングへの据え付け誤差および磁場の誤差のない場合の電子の軌道方程式は

$$\frac{d^{2}x}{ds^{2}} + K_{x}(s) x = \frac{\Delta E}{E} \frac{1}{\rho}$$
(2.4-1)
$$\frac{d^{2}z}{ds^{2}} + K_{z}(s) z = 0$$
(2.4-2)

で表される。ここでx, z は水平方向および垂直方向の中心軌道からの振幅である。リン グ1周について電磁石がある箇所とない箇所があるので、 ρ およびK は軌道長 s の関数と なる。 ρ は偏向電磁石の曲率半径であり、偏向電磁石がない箇所では 1/ρ は零である。 ここで、偏向電磁石の場合のK_x、K_z は

$$K_{x} = \frac{1}{\rho^{2}} - \frac{B'(0)}{B_{0} \rho} , \quad K_{z} = \frac{B'(0)}{B_{0} \rho}$$
(2.4-3)

4極電磁石の場合は、

$$K_{x} = - \frac{B'(0)}{B_{0} \rho} , \quad K_{z} = \frac{B'(0)}{B_{0} \rho}$$
(2.4-4)

である。B'(0) はB'(0) = $\partial B_z / \partial x |_{x=0}$ で与えられ、B₀ は偏向電磁石の中心 磁場である。 (2.4 -1) 式の解は

 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{\beta} + \mathbf{x}_{\varepsilon} \tag{2.4-5}$

とかける。 x_{β} と x_{ε} はそれぞれ

$$\mathbf{x}_{\beta} = \sqrt{\varepsilon \beta (\mathbf{s})} \cos \left[\phi (\mathbf{s}) + \phi_{0}\right]$$

$$\mathbf{x}_{\varepsilon} = \eta \frac{\Delta \mathbf{E}}{\mathbf{E}}$$
(2.4-6)
(2.4-7)

となる。 ε は定数であり、 β (s)はs点におけるベータトロン関数、 η はエネルギー分 散関数である。また、

$$\phi (s) = \int_{0}^{s} \frac{ds}{\beta (s)}$$
(2.4-8)

となることが示される。 ϕ (s) はベータトロン振動の位相、 ϕ 。は初期位相でありリン

グ1周についてみると、 x_{β} の振動回数がわかる。よって、中心エネルギーEの電子に対して振動数を ν とすると

$$2\pi \nu = \int_{0}^{c} \frac{\mathrm{d} \mathrm{s}}{\beta \mathrm{(s)}} = \frac{2\pi \mathrm{R}}{\overline{\beta}} \qquad (2.4-9)$$

となる。ここで、Cをリング周長とするとC = $2\pi R$ であり、 β は周長にわたる β (s) の平均を意味している。一方、エネルギーのずれ \triangle Eの電子が感じる収束力Kは

$$\frac{K}{1 + \triangle E \neq E} \sim K - K \triangle E \neq E$$
(2.4-10)

& E = 0の電子より $-K \cdot \triangle E / E$ だけ弱くなる。つまり、 ν が

$$\Delta \nu = -\frac{1}{4\pi} \int \mathbf{K} \beta \quad (s) \quad \mathbf{d} \quad \mathbf{s} \cdot \Delta \mathbf{E} \neq \mathbf{E}$$
(2.4-11)

だけ減少することになる。これをチューンシフトと呼ぶ。そこで、

$$\Delta \nu = \xi \quad \frac{\Delta E}{E} \tag{2.4-12}$$

なる量を定義してこれをクロマティシティ(色収差)という。

(2.4 -11) と(2.4-12)式で示されるように、4 極電磁石の所で β が大きいと ξ の絶対値 が大きくなり電子の運動が不安定となる場合がある。

また $\triangle E \neq 0$ の電子は、中心のエネルギーを持った電子の平衡軌道とは異なった軌道を周 回することになる。 $\triangle E > 0$ の電子は、 $\triangle E = 0$ の電子より周回軌道は長くなり、 $\triangle E < 0$ の電子のそれは短くなる。ここに示した軌道長のずれは

$$\frac{\Delta C}{C} = \alpha \quad \frac{\Delta E}{E} \tag{2.4-13}$$

で定義される。 $\triangle C \ t \triangle E = 0$ の電子の周長に対する $\triangle E \ o$ 電子の周長の差であり、 α は モーメンタムコンパクションファクターである。 α はエネルギー分散関数に関係しており、 実際 α は

$$\alpha = \frac{1}{C} \oint \frac{\eta}{\rho(s)} ds \qquad (2.4-14)$$

と書くことができる。ここで△Cに寄与するのは曲率 1/ρがある偏向電磁石のみである ので、積分は1周にわたる偏向電磁石内で行えばよいことがわかる。 ビームのエミッタンス(位相空間(x, x')におけるビームの大きさ)はビームの性能に関して重要な量である。電子の位置 x は(2.4 -6)式に与えられているので、傾き x' $\operatorname{tx'} = \operatorname{dx/d} \operatorname{s}$ で求められ

$$\mathbf{x}' = -\sqrt{\varepsilon / \beta (\mathbf{s})} \{ \alpha (\mathbf{s}) \cos [\phi (\mathbf{s}) + \phi_0] + \sin [\phi (\mathbf{s}) + \phi_0] \}$$
$$= -\sqrt{\varepsilon \gamma (\mathbf{s})} \sin [\phi (\mathbf{s}) + \phi'_0] \qquad (2.4-15)$$

となる。ここで α 、 β 、 γ はツイスパラメータである。 (2.4 -6), (2.4 -15) 式を用いて

$$\frac{1}{\beta} \left[\mathbf{x}^{2} + (\alpha \mathbf{x} + \beta \mathbf{x}')^{2} \right] = \gamma \mathbf{x}^{2} + 2 \alpha \mathbf{x} \mathbf{x}' + \beta \mathbf{x}'^{2} = \varepsilon$$
(2.4-16)

が導かれる。この式から明らかなように、ビームエミッタンスはリングを1周する毎のx に対して不変であるばかりでなく、楕円方程式であるのでリングのどの場所においても不 変であることを示している。楕円x, x'軸の最大値は、

となるから、 \mathbf{x}_{max} はビームサイズを与えることになる。リング内の電子ビームはガウス 分布をしているので、標準偏差 σ をもってビームサイズとする。(2.4 –17)式の β は一 般的に $\beta \sim \mathbf{R} / \nu$ と近似できるので、ビームサイズは ν に依存することがわかる。

しかし、実際の電子蓄積リングにおいては、SR光を放出するため上述の不変量であっ たはずのエミッタンスが減衰する。すなわち、リングに入射された直後の電子の振幅は、 SR光放出による放射減衰と、光子という形でエネルギーを確率的に放出するために、電 子の振動がランダムに揺さぶられることに起因する放射励起が平衡に達するまで減少する。 ベータトロン振動のx – z結合がない場合の水平方向の平衡状態エミッタンスは(2.4 – 17) 式を用いて

$$\sigma_{x_{\beta}} \nearrow \beta = \frac{J \varepsilon}{J_{x}} < H > \left(\frac{\sigma_{\varepsilon}}{E}\right)^{2} = \varepsilon_{x_{0}}$$
(2.4-18)

で与えられる。ここで $(\sigma_{\epsilon} / E)^{2}$ は放射励起によるエネルギーの拡がりである。ただ

し<H>は

$$< H > = \frac{1}{2\pi\rho} \int \frac{1}{\beta} \{\eta^{2} + (\beta\eta' + \alpha\eta)^{2}\} ds$$
 (2.4-19)

であり、積分は全偏向電磁石について行うものとする。 J_{ϵ} はdamping partition number と呼ばれ、ここでは $J_{\epsilon} \sim 2$ であり、 J_{\times} は $J_{\times} = 1 - D$ で定義される。Dはエネルギー のずれた電子が偏向電磁石内を走る道のりと中心のエネルギーをもつそれとの差であり、 Dは

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\alpha} \, \mathbf{R} / \boldsymbol{\rho} \tag{2.4-20}$$

となり、一般的には小さい値である。

放射励起によるエネルギーの拡がりは、

$$\left(\frac{\sigma_{\varepsilon}}{E}\right)^{2} = \frac{\gamma^{2}}{J_{\varepsilon} \rho} \frac{\hbar}{mc} \frac{55}{32\sqrt{3}}$$
(2.4-21)

となる。以上よりリング内での水平方向ビームサイズは、(2.4 -5)式を用いて x^2 の統計的平均をとり< $x^2 >= \sigma_x^2$ とすると、 x_β と $\triangle E / E$ は相関がないので

$$\sigma_{\times} = \sqrt{\sigma_{\times\beta}^{2} + (\eta \sigma_{\varepsilon} / E)^{2}}$$
(2.4-22)

で与えられる。一方垂直方向ビームサイズは、設計上垂直方向にエネルギー分散がないの で零であるが、実際には水平方向と垂直方向のベータトロン振動のカップリングの寄与に よりビームサイズは有限となる。水平方向のエミッタンスをε、、垂直方向のエミッタン スをε」として、カップリング係数をK=ε」/ε、と置くと

 $\varepsilon_{x} = \varepsilon_{x0}/(1+K)$, $\varepsilon_{z} = K \varepsilon_{x0}/(1+K)$ (2.4-23) $\xi_{z} = K \varepsilon_{z}$

2.4.2 入射エネルギー

超電導小型電子蓄積リングを電子入射器も含めて産業用装置とする場合に重要なこと は、入射エネルギーの選択¹⁾である。既存の電子蓄積リングには、電子を入射エネルギー が10~100 MeV程度で入射後、シンクロトロンモードでリング内で加速して動作エネルギ - 200MeV~1 GeVで蓄積するものがある。この種のリングでは磁場上昇の応答を良くす

るために、渦電流損失および残留磁界が小さく、透磁率の大きい珪素鋼板(積層板)が用 いられており、装置全体の建設コストは安価であるが、蓄積しうる電流は定常的には数10 mAと低い。一方、他の多くのリングでは入射エネルギーとして 250MeV以上あるいはリ ングの蓄積エネルギーと同じエネルギーの電子を入射しており、100 mA以上の蓄積電流 が得られている。これらのリングの場合、電磁石の磁場は入射後ゆっくり上昇させるか、 蓄積エネルギーに相当する磁場に固定しておけばよいので磁極材として軟鉄を用いること ができる。リソグラフィ光源として要求される蓄積電流200 mA以上を得るには 250MeV 以上のエネルギーで入射を行うのが望ましい。しかし、産業用装置という観点からは小型 リングの大きさに適合した電子入射器が必要とされる。従って、電子入射器の小型化は、 高電界加速や新加速方式の開発²⁾⁻⁴⁾などの入射器自体の改良および開発と低エネルギー 入射による大電流蓄積技術の確立の両面から検討されて来ている。前者によって大幅な小 型化が直ちに可能という段階ではなく、その小型化は次世代の衝突型加速器への適用を目 指したものである。 超電導小型電子蓄積リングに低エネルギーで入射を行い、 超電導電 磁石の励磁をシンクロトロンモードで行うとなると、超電導体に特有な、本質的なヒステ リシス損失も考慮しなければならず、大電流の加速、蓄積は極めて困難である。そこで、 電子のTouschek寿命を長くして、低エネルギー入射で大電流を蓄積後、数十秒から数分か けて蓄積エネルギーまで加速する方式が本命となる。しかし、実際に低エネルギー入射に より大電流蓄積が可能であるか、あるいは蓄積電流を制限する不安定性についてNIJI - I を用いて詳細に研究しなければならない(図2.4 -1)。



図2.4-1 小型電子蓄積リングシステム 運転の概念図 NIJI-Iは図2.4 -2 に示すように、電子技術総合研究所(ETL)の 500MeVリニ アック(TELL)^{5) 6)}の中段から振り分けられる80~ 160MeVの電子の供給を受けるこ とができる。まず最初は、ビーム蓄積の困難性を軽減するために 160MeVの電子入射を行 い、目標とした200 mA以上の蓄積を達成した後に、さらに低エネルギーの入射を行い問 題の所在を明確にすることとした。



図2. 4-2 ETLリニアック施設

2.4.3 リング基本構成

リングの形状は、設計段階では円型およびレーストラック型について検討したが、加速 器室のスペースの制約から円型を採用した。NIJI-Iの平面図を図2.4 -3 に、設計 パラメータを表2.4 -1 に示す。偏向電磁石(B_D)は8台であり、長直線部が4箇所、 短直線部が4箇所ある。各々の長直線部(S₁, S₃, S₅, S₇)には2台の横収束4極電 磁石(Q_F)を置き、各々の短直線部(S₂, S₄, S₆, S₈)には1台の縦収束4極電



図2.4-3
 NIJI-Iの平面図、B
 (B_D)偏向電磁石、Q_F
 横収束4極電磁石、QD 縦
 収束4極電磁石、BPMビ
 ームポジションモニター、
 DC-CT磁気変調型トラ
 ンス、S直線部

表2. 4-1 設計パラメータ

Injection energy	$8 \ 0 - 1 \ 6 \ 0 \text{MeV}$
Stored energy	230MeV (max)
Circumference	13.256m
Focusing order	$0/2 \hspace{0.1in} Q_{\hspace{0.1in}\text{F}} \hspace{0.1in} B_{\hspace{0.1in}\text{D}} \hspace{0.1in} Q_{\hspace{0.1in}\text{D}} \hspace{0.1in} B_{\hspace{0.1in}\text{D}} \hspace{0.1in} Q_{\hspace{0.1in}\text{F}} \hspace{0.1in} 0/2$
Periodicity	4
Bending radius	ho=0. 7 m
Length of bending magnet	L = 0.490 m
Bending field index	n = 0.5
Varigantal batatron tuna	$1 9 \leq y \leq 1 9 (y_0 = y_0 = h_0)$
	1. $2 < p_x < 1$. 0 (valuable)
Vertical betatron tune	1. $2 < \nu_z < 1$. 8 (variable)
Length of quadrupole	$L_{F} = 0.2 m$
magnet	$L_{D} = 0.1 m$
Field gradient of	$0 < K_{\rm F} < 8$. 5 m^{-2}
quadrupole magnetat at 160 Me V	$0 < K_{\scriptscriptstyle\rm D} < 5$. 6 m^{-2}
Frequency	f = 1 5 8. 4 MHz
Revolution frequency	$f_{r} = 2 2. 6 3 MHz$
Harmonic number	h = 7
Synchrotron radiation	Urad = 0. 35KeV
loss (at max. 230 MeV)	
Maximum rf power	P = 2 k W

磁(Q_D)を設置する。リニアックから輸送された電子は、 S_1 に置いたセプタム電磁石 によってリング内の中心軌道と平行に入射され、 S_5 に置いた変形軌道を形成するキッカ ー電磁石によってリング内に蓄積される。リングの超高真空系とセプタム真空槽は50 μ m のポリイミド膜で分離されている。 S_7 にはrf加速空胴が設置されており、rf電源か ら最大 2 kWの電力の供給を受けることができる。リングには、この他、ビーム計測系と してS₃, S₅, S₇ にビームポジションモニタ(BPM)、蓄積電流モニタ(DC-CT) ならびにベータトロン振動数測定用RF-KO電極が取り付けられている。

設計方針に示したように、低エネルギー入射により大電流蓄積を成し遂げる上での最大の問題点の一つは、Touschek効果による蓄積ビームの寿命が短いことである。Touschek寿命は、蓄積電子の密度の逆数に比例するので、ビームサイズを大きくすることにより寿命を延ばすことができる。ビームサイズを増加させるにはモーメンタムコンパクションファクター α あるいはエネルギー分散関数 η を大きくすればよい。それ故、偏向電磁石の n 値を0.5 に選んだ。 n 値は

$$n = - \frac{\rho}{B} \frac{\partial B_z}{\partial x}$$
(2.4-24)

で定義される。ここでρは偏向半径、Bは中心軌道での磁場の強さである。さらに、偏向 電磁石に12°のエッジ角をつけ縦収束力を持たせたので、設計上はQ_Dを無くしてしまう ことも可能であった。しかしQ_Dを付加することに決定したのは、これがラティスとして のフレキシビリティを増し、広い範囲での動作点のサーベイにおいて有用になると期待さ れるからである。

2.5 入射系

リングにビームを入射して蓄積する方法としては、ファーストキッカー電磁石を用いる 方法(一回転入射法)とキッカー電磁石を用いる方法(多重回転入射法)がある。NIJ I-Iは、多重回転入射法を採用する。この節では、低エネルギー電子を効率よくリング 内に蓄積するために重要な入射系について述べる。

この節の目的は、

1) 高効率入射のために要請されるキッカー電磁石設計に関する考察。

2) 従来用いられてきたサーチコイルにかえ光ファイバ磁界センサを適用した時間 分解能、空間分解能に優れた磁場計測技術の開発。¹⁾

の2点である。

2.5.1 入射系に対する要請

図2.5 -1 はNIJI-Iの長直線部S」の入射セプタム電磁石部構造である。リニア



図2.5-1 入射セプタム電磁石部の 構造

ックから輸送されてきた電子はセプタム電磁石で25°偏向され、中心軌道から40mm外側 に、ポリイミド膜の窓を通り中心軌道にほぼ平行に入射される。図に示すように真空槽は 隔壁により分離してある。分離された一方はリングの超高真空槽に接続し、他方はセプタ ム電磁石の珪素鋼板を積層するのに用いる接着材からの放出ガスがリング内に流入するの を防止するためである。セプタム電磁石の開口は幅12mm、高さ 8mmであり、偏向半径 は1.1 mであるから 160Me Vの入射電子に対して、必要な磁場は4.85 kGとなる。励磁は 約 500 µ s の正弦半波を用いる。約 0.5 µ s の入射ビームに対して、半波正弦波の頂上は 十分に平坦である。

セプタム電磁石によりリング内に入射されたビームは、平衡軌道に沿ってベータトロン 振動しながら周回することになる。n回転後、nv、が整数に近づくと、ビームの変位 は、入射時の平衡軌道からの変位に近づくため、ビームはセプタムに衝突して失われる。 キッカー電磁石は、ビームの入射時に平衡軌道を一時的にセプタムに近づけることにより、 ベータトロン振動振幅を小さくするために用いられるパルス電磁石である。そして、ビー ムはキッカー電磁石の磁場の減衰特性に従って中心軌道に引き戻されるので安定に周回す ることになる。この動作を繰り返し行うことによりビームを蓄積してゆくことができる。

通常、大型のリングでは、複数台のキッカー電磁石を用いて入射を行っているが、NI JI-Iの場合、周長13.256mの小型リングであるのでセプタム電磁石の対向部に1台の キッカー電磁石を設置する。

まず、セプタム電磁石から入射されたビームが効率よく蓄積されるための必要条件を考 える。図2.5 -2 に入射点におけるビームの位置関係の模式図を示す。セプタム電磁石内



図2.5-2入射点におけるビームの位置関係を示す模式図

を通過する入射ビームの水平方向の幅をW₁,リング内の蓄積ビームの水平方向の幅を W_s、セプタムの厚さをh、ビームのリング周回時間をTとする。ビームがリング内に入 射される時刻をt=0 とし、その時の平衡軌道は中心軌道からセプタム側へa。の位置ま で変位しているものとする。キッカー電磁石の磁場の減衰により、移動速度 η で中心軌道 に向かう平衡軌道の位置は

$$a(t) = a_0 - \eta t$$
 (2.5-1)

となる。ビームの蓄積過程では、次の4条件を満たすことが必要である。

① 入射されたビームが、n回転後 (n
$$\nu_x$$
 ~整数) においてセプタムに衝突しない。
 $\eta n T \ge W_1 + h$ (2.5-2)

② 入射ビームのn回転未満で、最もセプタムに近づく早い回転数Nおいてセプタムに 衝突しない。

 $\eta NT \ge W_1 + h - (x_0 - a_0) \{1 - \cos(2\pi/N)\}$ (2.5-3)

③ 入射ビームの先頭からt」遅れたビームまで蓄積可能とする。

$$a_0 - \eta t_1 \ge \eta n T$$
 (2.5-4)

④ 入射の間、すでに蓄積されているビームは安定である。

$$a_0 \leq x_0 - \{h + (W_1 + W_s) / 2\}$$
 (2.5-5)

NIJI-Iの場合、T=44ns, x₀=40mm, h=6.5 mm, W₁=12mmであ る。また、蓄積ビームの水平方向の幅は余裕をみてW_s=3 mmとし、③の条件に対して は、少なくともリング一周分に相当するビームが入射できることを条件とした。ラティス 設計より、水平方向ベータトロン振動数の可変範囲は $1.2 \le \nu_x \le 1.8$ であるので、 ν_x = 1.2(1.8)、 $\nu_x = 1.4(1.6)$ (いずれもn=5) について (2.5 - 2) ~ (2.5 - 5) 式を用いて計算した結果、 $\nu_x = 1.2(1.8)$ では、a₀、 η の解は存在しない。図2.5 - 3 に示すように $\nu_x = 1.4(1.6)$ に対しては、a₀ ~ 24mm、 $\eta \sim 0.87 \times 10^8$ mm/sの領域



図2.5-3 ビーム蓄積条件を満たす領域 (vx=1.4(1.6)の場合)

に解が存在する。キッカー電磁石はセプタム電磁石の対向部の対称点に設置されているので、perturbation理論²⁾を用いて

 $a_{0} = \phi_{k} \beta_{x0} \frac{\cos(\pi \nu_{x})}{\sin(2\pi \nu_{x})}$ (2.5-6)

と表せる。ここで、 ϕ_{k} はキッカー電磁石による偏向角、 β_{0x} は入射点およびキッカー電磁石位置での水平ベータトロン関数である。(2.5 -6)式より要求される a 。の値に対し、 ϕ_{k} が決まってくる。 $\nu_{x} = 1.4$ のとき、 $\beta_{x0} \sim 2$ m、 a 。 ~ 24 mmであるから $\phi_{k} \sim -23$ mrad 、また磁場の減衰時間は a $_{0}\eta^{-1} \sim 300$ n s となる。ここで得られる入射効率の良い動作点で、必ずしも蓄積ビームの寿命が長いという訳ではないので、入射蓄積実験により最適化をはからなければならない。 ν_{x} に対する a 。 $/\phi_{k}$ β_{x0} の関係を図2.



図2. 5-4 ν x に対する a o ∕ φ k β x 0 の関係

5 -4 に示す。 ν_x が半整数に近い程 ϕ_x は大きく、整数に近い程 ϕ_x は小さくてよいこ とがわかる。リングの設計動作範囲は $1.2 \le \nu_x \le 1.8$ であり、 $\nu_x = 1.5$ の共鳴近くを 避けかつ対称性より $1.2 \le \nu_x \le 1.4$ で計算した。その結果、キッカー電磁石としては、 - 8~-23mrad の偏向角を与えることができ、入射ビームの初期振幅±40mm範囲で磁 場の一様性を有し、かつその減衰時間 300~500 n s を満たすことが望まれる。

2.5.2 キッカー電磁石系の設計

キッカー電磁石は、構造的に強固なものとする必要があり、これを0.65mの長直線部に 設置される0.5 m長の真空槽の中に収納することにした。超高真空中のフェライトの使用 はガス放出の問題が生じるので不適当である。キッカー電磁石の磁場をB、その長さをL とした時、電磁石はBL=114G・mの最大偏向力を発生できる必要があり、磁場の半径方 向の一様性は80mmの範囲で要求される。従って、gauss/ampere比がより高く、磁場の一 様性範囲の広い形状を選択するのがよい。板状の空心コイルを採用し、望ましい形状を有 限要素法による計算機シミュレーションで求めた。図2.5 -5 に設計したキッカー電磁石 の構造を示す。空心コイルは厚さ 5mm、長さ 435mmのステンレス板であり、両端部に



図2. 5-5 キッカー電磁石の構造

おける磁場の乱れを少なくするため切り欠き枠を設けている。電磁石はセラミック碍子3 本により取付位置を調整されるとともに真空槽と絶縁される。励磁電流はコイルの片端に 設けた端子へ電流導入端子を通り供給される。図2.5 -6 に半径方向の磁場分布を示す。 縦軸は励磁電流 1Aあたりの発生磁場である。中心軌道での発生磁場H₂ =0.052G/A に 対する磁場の変化 \triangle H₂ は±40mmの範囲で \triangle H₂/H₂~0.04を満足している。



キッカー電源としてL、C、Rからなる放電回路を構成し、半波約1 μ sの減衰正弦波 として変化する磁場の第1波立ち下がりを用いる。回路構成にあたっては、最大 5 kAの 励磁電流が発生でき、同時に電源電圧があまり高くならないようにL分をできるだけ低く しなければならない。そこで 6 kV以上で動作するEG&G製GP-22B型放電ギャップ を選定し、R、Cも残留インダクタンスの少ない円板型セラミック抵抗(1 Ω × 2 τ)、 セラミックコンデンサ(2700pF×26個)を用い、配線上の工夫も行った。

2.5.3 光ファイバ磁界センサ³⁾による磁場測定

(i) 磁界センサの原理と構成

磁界センサは、ビスマス・シリコン・オキサイド(Bi12 SiO20;以下BSOと略称 する)単結晶の電気光学効果を利用したものである。BSO単結晶は、体心立方晶・空間 群23に属する誘電体単結晶であり、可視光領域において顕著なファラデー効果を示すこと ことは、A.Feldman らによって報告されている。⁴⁾ センサの構成を図2.5 -7 に示す。セ



図2.5-7 光ファイバ磁界センサの構造

ンサは偏光子、BSO単結晶、旋光子、検光子およびレンズ系で構成されており、光ファ イバとはコネクタにより接続できる。偏光子により直線偏光された光はBSO単結晶に入 射されるが、結晶中の磁界方向の有効光路長を増すことにより、さらに感度を上げ位相の ずれを生じさせないように TiO₂/SiO₂の多重反射膜を採用している。この方式 はBSO単結晶の旋光能を完全に打消すためにも有効である。また偏光子と検光子の間に $\pi/4$ のバイアス角度を持たせるため、旋光子を挿入している。コネクタを除くセンサの 寸法は20×15×14mmであるが、磁界に対する空間分解能は図2.5 -7 に示すW= 5mm と光ビーム径 2mmφによって決まる。このセンサに光の進行方向と同一方向に磁界Hを 加えると磁界の強度に比例して光の偏波面が回転する。この角度 θ は素子長を ℓ 、ベルデ 定数をV。とすると

 $\boldsymbol{\theta} = \mathbf{V}_{e} \cdot \boldsymbol{\ell} \cdot \mathbf{H} \tag{2.5-7}$

で表される。実際のセンサに用いる波長0.87μmのLED光に対するベルデ定数は0.1 min/Oe・cmである。

検光子角がπ/4の場合、透過光の強さ Pはファラデー効果によって

 $\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 \quad (1 + \sin 2\theta) \tag{2.5-8}$

の形で変化する。ここで P 。は磁界が零の場合の透過光であり、sin2 θ は変調度mを表 す。ファラデー回転角 θ が $\pi/4$ より十分小さい場合、変調度mは磁界の強さHに比例す る。

磁界センサは磁界によって透過光を振幅変調する形のものであるので、E/O・O/E


図2.5-8
 E/O-O/E変換器のブロ
 ックダイヤグラム

変換器が使用できる。図2.5 -8 に変換器の回路構成を示す。図に示すように、入射光の 直流成分が常に一定となるようにLED側にフィードバックして、センサや光ファイバの 光損失を補償する構成とし、常に変調度mに比例した出力が得られるようにしてある。

(ii) 磁界センサの特性

磁界センサの特性として、磁界強度に対する出力電圧の直線性、温度特性および周波数 特性を把握しておく必要がある。図2.5 -9 に印加磁界と出力電圧の関係を示すが、測定 した 400Gまで直線的に変化していることがわかる。



図2. 5 - 9 磁界センサの入出力特性

温度特性は、ファラデー効果の温度依存性によって決まる。図2.5 -10に示すように、 センサ部のみをペルチェ素子で冷却・加熱することによって測定した温度係数は約 1.5× 10⁻⁴/℃であり、測定範囲-20℃~90℃において± 1%以内の良好な温度安定性を示して いる。BSO単結晶のベルデ定数は温度上昇とともに増大する傾向にあるが、組立て後の センサはやや減少する傾向を示す。この原因はBSO単結晶以外の光学部品の温度特性に よるものである。



図 2.5-10温度特性測定系

センサの周波数特性は主にE/O・O/E変換器によって決まる。高い周波数成分を含 む電界を測定する際に留意しなければならないピエゾ共振は、磁界センサでは生じないた め、センサそのものの周波数帯域は十分に広いことがわかっている。そこで、E/O・O /E変換器の周波数特性を測定した。入出力波形をスペクトラムアナライザで解析し、入 出力間の周波数応答を求めたところ図2.5 -11に示すように~ 1MHz の間でほぼ平坦な 特性を有することが確認できた。



図2.5-11 E/O·O/E変換器の周波数特性

(ⅲ) キッカー電磁石のパルス磁場測定

キッカー電磁石は図2.5 -12に示すように $385mm\phi \times 500 mmの真空槽に設置し、励磁電流 1.3 kA~5.0 kAの範囲で試験を行った。測定のセットアップはベッド、X-Y$



図2.5-12 真空槽内に設置したキッカー 電磁石

テーブルおよび先端に磁界センサを取り付けたアームにより構成されている。測定の目的 は、キッカー電磁石の磁場波形、半径方向の磁場の均一性および長手方向の有効長を調べ ることである。このような磁場の周波数の高い応答には、一般的に真空槽に誘起される渦 電流による磁場からの応答が含まれる。励磁電流に対する磁場の応答を確かめるために、 電流波形をCT(current transformer)でモニターしながら磁界センサで磁場を測定した。 電流波形と磁場波形を図2.5 -13に示す。測定された磁場の極大値と励磁電流より算出し た磁場の極大値は極めてよく一致している。これは真空槽の直径がキッカー電磁石の幅の 約3倍あるため、渦電流による磁場の影響がかなり小さいためであると考えられる。

次に半径方向の磁場分布の測定を行い、計算機シミュレーションで求めた磁場分布と比較した。測定は設計軌道を中心とした磁場の一様性が要求される半径方向±40mmの範囲で行った。図2.5 -14に実線で示した計算値と実測値は誤差の範囲で一致している。

有効長を見積るためにキッカー電磁石の設計軌道に沿ってセンサを移動させた。コイル の両端では磁場が急激に減少するため、有効長としては端部磁場分布を積分して評価しな ければならない。コイル長0.435 mに対し、有効長は0.42mで見積ればよいことがわかっ た。

この光ファイバ磁界センサは、従来のサーチコイルを用いた磁場測定法に比して、空間 分解能が光ビーム径で決まる 2mmと高く、センサと検出部は電気的に絶縁されているの で電気雑音の影響を受けにくい等の特徴を有しているため、実用的な磁場測定用センサの 1つとして有望視される。



Current waveform

795.5A/div 0.5µs/div

図2.5-13 磁場のパルス応答性



Output of sensor 0.2V/div 0.5µs/div



図2.5-14
 相対的磁場強度分布に関する計算機
 シミュレーションと実験結果の比較

2.6 電磁石系

リングを構成する電磁石は、偏向電磁石(B_D)ならびに4極電磁石(Q_F, Q_D) からなる。電子エネルギーは通常入射時160 MeV、最大蓄積時230 MeVとして電磁石およ びそれらの電源の設計を行った。設計に従って製作された全電磁石についてその励磁特性、 磁場分布の一様性、漏洩磁場などを測定し、その結果をふまえてリングシステムへの適用 性を考察することとした。 2.6.1 偏向電磁石のn値

電子が磁場中で偏向される際の運動方程式は、一次近似までとると次のように記述できる。

$$\frac{d^{2} x}{d s^{2}} = -\frac{(1-n)}{\rho^{2}} x$$
(2.6-1)
$$\frac{d^{2} z}{d s^{2}} = -\frac{n}{\rho^{2}} z$$
(2.6-2)
$$x : 偏向半径方向の電子の中心軌道からのずれ
z : 偏向面に垂直な方向の電子の中心軌道からのずれ
s : 中心軌道に沿って計った長さ
\rho : 中心軌道の偏向曲率半径$$

n:n值

この磁場の効果は(2.6-1)(2.6-2)式からわかるように、n値を選ぶことによりx方向およびz方向の中心軌道からのずれが振動解を持つか、発散するかが決まってくる。安定な 軌道を得るためには、x、z方向ともに振動する(2.6-3)式の条件が必要である。

0 < n < 1 (2, 6-3)

ただし、上記の議論は、偏向電磁石以外に収束機構を持たないリングに対してであり、別 に4極電磁石などの収束機構をもつリングにおいては、z方向の収束をそれらに受け持た せることができるため、製作の容易なn=0の偏向電磁石を用いることが多い。しかし、 リングのコンパクト化のため、z方向収束用4極電磁石の収束力を著しく低減させること およびリングを回っている電子の振動(ベータトロン振動、シンクロトロン振動)がSR 光を放射することによりすみやかに減衰¹⁾することが必要であることの2点よりn値を持 たせることを決定した。特に後者に関して考察する。

シンクロトロン振動の damping time は、

$$\tau_{\varepsilon} = \frac{2 E_0 T}{J_{\varepsilon} U_0}$$

$$J_{\varepsilon} = 2 + D$$
(2.6-4)

で与えられる。

Dは

$$D = \int \eta \ (1 \swarrow \rho^{3} + 2\kappa \swarrow \rho) \ ds \checkmark \int \frac{ds}{\rho^{2}}$$

$$\kappa = \frac{1}{(B\rho)_{0}} \left[\frac{dB}{dx} \right] = -\frac{n}{\rho^{2}}$$
(2.6-5)

η : エネルギー分散関数

となる。一方、x、z方向のベータトロン振動の damping time は

$$\tau_{x} = \frac{2 E_{0} T}{J_{x} U_{0}}$$
(2.6-6)
$$J_{x} = 1 - D$$

$$\tau_{z} = \frac{2 E_{0} T}{J_{z} U_{0}}$$
(2.6-7)
$$J_{z} = 1$$

以上より、n=0.5の時には(2.6-5)式よりD=0となり、(2.6-4)、(2.6-5)式より明らかなようにE。、 ρ のみによって damping time が決まる。また、(2.6-6)式よりDが1より大きくなると、ベータトロン振動は dampingではなく anti - damping となり、電子が蓄積できなくなるが、D=0とすることによりこの種の不都合を避けることができる。よってn値として0.5を採用することとした。²⁾

偏向電磁石は磁極材として軟鉄を用い、リング基本設計を基に表2.6-1の仕様とした。

偏向電磁石数	8
偏向半径	0.7 m
偏向角	45°
エッジ角度	12°
n値	0.5
中心のギャップ高さ	51.7mm
ポールピース幅	200 mm
中心軌道上磁場	11 KGauss (at 230 MeV)

表2.6-1 偏向電磁石の仕様

表の仕様に基づいてポールピースの形状を決定する。一般にn値を持つポールピース形状 は(2.6-8)式で表される。

$$z = \pm \frac{z_{0}}{1 - n \frac{x}{\rho}}$$
(2.6-8)

ここで x、z : ポールピースの形状を与える座標

 z_{0} : 中心軌道のギャップ高さ 実際には、偏向半径 ρ に比べて電子の変位(x)は小さいから、(2.6-8) 式を展開して $z \sim \pm z_{0} (1 + n - \frac{x}{2})$ (2.6-9)

と直線で近似しても差しつかえなく、製作も容易となる。上式より求めた直線的に傾いた ポールピースの磁場分布の有限要素法による計算機シミュレーション結果を図2.6-1 に示 す。縦軸は中心軌道位置の磁場値B。で規格化してある。この結果より明らかなように、



図2.6-1 ポールピースに1.057°の 直線傾斜をつけた場合の半 径方向磁場分布の計算機シ ミュレーション結果 中心軌道位置から外側へ40mm以上ずれると、フリンジ効果で磁場勾配は急に大きく変化 する。これをn値で整理すると図2.6-2の二点鎖線で示した分布となる。入射直後の電子 ビームは、中心軌道から±40mmずれた軌道を通過するため、軌道のずれを考慮して、中 心軌道位置から±50mmはn=0.5 ±0.1以内に収まるように設計しておく必要がある。 そこで、ポールピースの外側に平担な部分を作り磁場の漏れを抑えてn値を補正すること にし、この平坦な部分の長さdをパラメータとして、n値の分布を求めた結果を図2.6-2 に示す。要求される範囲でn値の一様性を満足するのはd=45mmの場合であることがわ かる。



図2.6-3 に偏向電磁石の断面図およびポールピースの形状を示しておく。

2.6.3 **偏向電磁石の磁場測**定

ポールピース形状の決定に従って製作された偏向電磁石 B₁ ~ B₈ の n 値の分布ならび に漏洩磁場分布が予定通りになっていることを確認することと、全電磁石の励磁特性を測 定することが行われた。 (i)測定装置および測定方法

磁場測定装置は RAWSON-LUSH ROTATING COIL GAUSSMETER (RAWSON-LUSH INSTRUMENT CO., INC.)を用いた。この測定装置の原理は静磁場中でプローブコイルが回転し、その際 に生ずる誘導起電力を測定するものであり、回転がコイルを貫通する磁束を変化させ、コ イル回転軸に垂直な成分の磁束密度を測定しうる。磁場測定精度は1×10⁻⁴である。

電磁石を200Aで励磁した後、電流値を一旦零に戻してから再び一定間隔で上昇させな がら各電磁石の磁場を測定した。測定はプローブコイル部を測定台上に置かれたX-Yス テージに取付けて行った。

(ii) 測定結果

① 励磁特性

電子エネルギーが160MeVの時、偏向電磁石はその中心軌道上の磁場が0.76Tとなるよう励磁される必要がある。ポールピース間中心面上で測定したB₁の励磁特性を図2.6-4 に示す。図より偏向電磁石に要求される磁場を得るための励磁電流は282Aとなり、励磁 電流に対して磁場は比例関係にあることが確認できた。



図2.6-4 偏向電磁石のB₁の励磁 特性

複数の偏向電磁石は1 台の電磁石電源により直列励磁されるため、個々の電磁石の励磁 特性は補正コイルの補正能力範囲に入っている必要がある。そこで励磁電流を200 Aとし て測定したB₁の磁場強度に対する他の電磁石の磁場強度の比を図2.6-5 に示す。B₁ に 対するB₂ ~B₈の磁場値の偏差は0.3 %以内であり、中心磁場0.76Tの時偏差磁場は



図2.6-5 偏向電磁石B₁に対する各 電磁石(B₂~B₈)の励 磁特性の偏差

23Gとなり、補正コイルの能力が約180 Gあることから全く問題がない。

n 値の分布

ポールピース間中心面上で測定した。結果は図2.6-6 に示す通りで、設計値n=0.5 に 対しn=0.47の磁場勾配となっていることがわかった。この程度のn値の相違は製作上な らびに測定上から生じた誤差と考えられる。n値の誤差によりベータトロン振動の収束力 が多少変化することになるが、4極電磁石で十分補正可能である。また、入射電子の最大 振幅±40mmの範囲で十分なn値の一様性が得られていることもわかった。



図2.6-6
 偏向電磁石のn値の分布、
 図はB₁を例にとってあり、
 計算機シミュレーションと
 測定結果を比較して示して
 ある。

③ 漏洩磁場分布

偏向電磁石の磁場分布は磁極端で外側へ漏れ出している。電子の偏向角は実際には、軌 道方向にとった長さsと軌道上の磁場強度Bで与えられる \int Bdsに依存する。電子軌道計 算においては、偏向電磁石の磁場で受ける中心軌道の偏向角と等しい偏向角を与える一様 磁場を仮定(sharp cut off 近似)して、その端を有効磁場端として取り扱っている。従 って、軌道計算に用いた有効磁場端距離と漏洩磁場分布より得られる実測磁場端の比較を 行った。B₁についての測定結果を図2.6-7に示す。測定位置は設計中心軌道に沿うz方 向である。図に示す通り、かなり磁極端の外側まで漏洩磁場があることがわかる。実測磁 場端を求めてみると磁極端より30.5mm外側に有り、これは実際の偏向電磁石のポールピ ースを漏洩磁場を考慮して30mm短く製作したのと極めて良く一致する。



図 2. 6 - 7 偏向電磁石 B」の漏洩磁場 分布

2.6.4 4極電磁石

4 極電磁石の仕様を表2.6-2 に示す。

表2.6-2 4極電磁石の仕様

	Q _F	Q D
電磁石数 磁極実長 (mm) ボア径 (mmφ) コイル巻数(turn/pole) コイル抵抗(Ω/pole) コイル電流 max(A) 冷却方式	8 150 100 135 0.1368 30 間接水冷	4 100 100 0.1125 15 自然冷却

4 極電磁石QF, QD の形状を図2.6-8 に示す。



図2.6-8

4極電磁石の形状、

SQH-15: 横収束4極

電磁石 (Q_F)

SQH-10: 縦収束4極

電磁石 (Q_D)

(i) 4 極電磁石の磁場測定

表2.6-2 に示した2種類の4極電磁石のうち、Q_D についてはその機能を偏向電磁石が 合わせ持つ構造としたため、ここでは重要度のより高いQ_F についてのみ磁場測定を行っ た。測定装置は 2.6.3項の偏向電磁石の磁場測定に用いたものと同様である。測定の目的 は4極電磁石の磁場勾配の一様性および一次近似の軌道計算を行うための有効長を求める ことである。

(ii)測定結果

4極電磁石の磁場勾配

4 極電磁石の中心軸を含む水平面上の横方向 x、ビーム軸方向 z とし、原点(x, z) =(0,0)を中心軸上の磁極中心とした時に、対称平面上の磁場 B(x, z)は中心軸 付近で展開されるが、展開形は次の形を取るのが理想的である。

B (x, z) =
$$x \frac{\partial}{\partial x}$$
 B (0, z) (2.6-10)

図2.6-9 に示すように、z = 0 mmにおける x 方向の磁場値は距離 x に比例して増加し ており、磁場勾配は x =50mmの範囲まで理想値通りになっていることがわかる。この範 囲は入射電子ビームの最大振幅を与える距離 x =40mmからみても十分な距離であり、磁 場勾配の均一性に対する要求条件を満足している。しかし、磁極端近傍から外側では、磁 場分布の理想値からのずれが顕著となる。図2.6-10に x =20,40mmの磁場値の比を z に ついて示した。距離 x に対する磁場値に比例関係が成り立っておれば、B(x=20)/B(x=40)=0.5 となるが、 z が大になるに従って磁極端の外側では磁場勾配の低減が大きくなる。 このずれが入射ビームの運動にどの程度影響するか設計段階では十分把握できないため、 実際にビームを入射して調べることとする。



図2.6-9 4極電磁石(Q_F)の磁場 分布



図2.6-10 4極電磁石(Q_F)の磁場 勾配の測定結果

② 4極電磁石の有効長

磁場勾配の z 方向の分布を示す曲線が x をパラメータとした測定から得られる。異なった x の値について比較する場合には、 z =0 における磁場勾配で規格化した相対的磁場勾配で表した方が便利である。励磁電流5.4Aの場合の x =20mmおよび40mmの相対磁場勾配を図2.6-11に示してある。求められた有効長は x =20mm, 40mmにおいて、ともに有効磁極端は実際の磁極端より外側19mmの位置にあり、磁極実長150 mmに対し有効磁極長188 mmであることがわかった。



図2. 6-11 4極電磁石(Q_F)の有効長の見積り

2.6.5 まとめ

偏向電極石の磁場測定に関して励磁特性、n値の一様性および漏洩磁場分布とも仕様を 十分満足していることが確認された。また4極電磁石に関しては磁極端における磁場勾配 の理想値からのずれが存在する。このずれを含め十分確認されていない磁場特性に起因す る不確定性は、リングを周回するビームのベータトロン振動数等に影響を与えると考えら れる。そこでリングの総合運転を通じて、電磁石類に関する問題点の抽出を行ない、その 結果を次ステップの超電導小型電子波動リングの設計に反映してゆく。

2.7 高周波(RF)加速系

2.7.1 RF加速の理論¹⁾

電子蓄積リング内を周回している電子の速度は、エネルギーによらずほぼ光速で運動す る。しかし、速度が等しくても電子のエネルギーが高いとリングを1周する時間はエネル ギーの低い電子より長くかかる。Cをリング周長、Pを電子の運動量とし、これを式で表 すと

$$\triangle C / C = \triangle t / t = \alpha \triangle P / P \sim \alpha \frac{\triangle E}{E}$$
(2.7-1)

となる。すなわち、momentum compaction factor α の定義である。ここで \triangle t は時間遅れ であるので \triangle t = - \triangle τ とし、差分を微分で代用すると、

$$\frac{\mathrm{d}\,\tau}{\mathrm{d}\,t} = -\alpha \frac{\Delta E}{E} \tag{2.7-2}$$

と書ける。

電子はSR光を放射することにより、エネルギーを失う。このエネルギーの損失をリング1周当りUとすると、それは△E=0の電子が加速電圧から与えられるエネルギーと等しいから

$$e V_0 = e \bigvee_{0}^{n} \sin \phi_0 = U$$
 (2.7-3)

となる。

また△E≠0の電子がリングを1周する間に加速電圧から得るエネルギーδEは

$$\delta \mathbf{E} = \mathbf{e} \mathbf{V} (\tau) - \mathbf{U} = \mathbf{e} \mathbf{V} (\tau) - \mathbf{e} \mathbf{V}_0$$
(2.7-4)

となり、さらに△E=0の電子はエネルギー変化を伴わないので次式で近似できる。

$$\frac{d \triangle E}{d t} = \frac{e V (\tau) - e V_0}{T} \qquad (2.7-5)$$

ここで、Tは電子のリング周回時間である。(2.7-5)式はシンクロトロン振動を記述する 式である。

(i) 微小振動の場合

 τ を小さいとすると、 e V (τ) - e V₀ ~ e $\dot{V}_0 \tau$ となり、(2.7-5) 式は

$$\frac{d\triangle E}{dt} = \frac{eV_0}{T} \tau \qquad (2.7-6)$$

となる。ここで

$$e \dot{V}_{0} = \omega_{rf} e \dot{V} \cos \phi_{0}$$

= h \omega_{0} U (q² - 1)^{-1/2} (2.7-7)

である。 q は q = e V/Uと書けるovervoltage factorである。(2.7-2) および(2.7-6) 式より

$$\frac{\mathrm{d}^{2} \tau}{\mathrm{d} t^{2}} = - \frac{\alpha \,\mathrm{e} \,\dot{V}_{0}}{\mathrm{T} \,\mathrm{E}} \tau \qquad (2.7-8)$$

を得る。この式の解はシンクロトロン振動の周波数

$$\Omega_{s} = \left(\frac{\alpha \, \mathrm{e} \, \dot{\mathrm{V}}_{0}}{\mathrm{T} \, \mathrm{E}}\right)^{1/2} = \left(\frac{\alpha \, \mathrm{h} \, \omega_{0}^{2} \, \mathrm{e} \, \mathrm{V} \cos \, \phi_{0}}{2 \, \pi \, \mathrm{E}}\right)^{1/2} \qquad (2.7-9)$$

を与える。

さらに(2.7-2) 式より、平衡状態の< τ^2 >= σ_{τ}^2 は

$$\sigma_{\tau}^{2} = \left(\frac{\alpha}{\Omega_{s}}\right)^{2} \left(\frac{\sigma_{\varepsilon}}{E}\right)^{2}$$
(2.7-10)

と与えられる。ここでは σ ε は光子放出に伴なうエネルギーゆらぎであり、

$$\left(\frac{\sigma_{\epsilon}}{E}\right)^{2} = \frac{\gamma^{2}}{J_{\epsilon}\rho} \frac{\hbar}{mc} \frac{55}{32\sqrt{3}}$$
(2.7-11)

と表すことができる。J_e はシンクロトロン振動のdamping partion numberで3に近い 値であり、 ρ は偏向半径、hはプランク定数を表す。よって σ_{τ} に相当するバンチ長さ σ_{ℓ_0} は、

$$\sigma_{\ell 0} = c \sigma_{\tau} = \frac{c \alpha}{\Omega_s} \frac{\sigma_{\varepsilon}}{E}$$
(2.7-12)

となる。 σ_{ℓ} 。は加速電圧および r f 周波数の関数である。

(ii) 大振幅振動の場合

(2.7-2) および(2.7-5) 式より

$$\frac{\mathrm{d}^{2} \tau}{\mathrm{d} t^{2}} = - \frac{\alpha}{\mathrm{ET}} \left\{ \mathrm{eV} (\tau) - \mathrm{eV}_{0} \right\}$$
(2.7-13)

となる。

次に

$$\phi (\tau) = \frac{\alpha}{\mathrm{ET}} \int_{0}^{\tau} \left\{ \mathrm{eV} (\tau) - \mathrm{eV}_{0} \right\} \mathrm{d}\tau \qquad (2.7-14)$$

である関数を定義すると、(2.7-13)式は

$$\frac{1}{2} \left(\frac{d \tau}{d t}\right)^2 = \phi_0 - \phi \ (\tau)$$
(2.7-15)

と表せる。シンクロトロン振動の全エネルギー ϕ 。がポテンシャルエネルギーと見なせ る $\phi(\tau)$ の内に留っている限り振動は安定であるが、 ϕ max 以上となると不安定となる。 この安定、不安定領域の境界をセパラトリクスという。 ϕ max は

$$\phi \max = \frac{\alpha U}{2\pi h E} \quad F (q) \qquad (2.7-16)$$

F (q) =2 {
$$\sqrt{q^2 - 1} - \cos^{-1}(1/q) }$$

で与えられる。この ϕ max と(2.7-2)、(2.7-15)式より、加速できる電子の最大のエネル ギーずれ量、すなわち安定領域の \triangle Emax は、

$$\left(\frac{\triangle E \max}{E}\right)^2 = \frac{2}{\alpha^2} \quad \phi \max = \frac{U}{\pi \alpha h E} \quad F(q) \qquad (2.7-17)$$

となる。 $\triangle E \max / E \operatorname{tr} f \operatorname{if} r \operatorname{y} h \operatorname{a}$ さであり、必要な $\triangle E \max \operatorname{cx} \operatorname{tx} \operatorname{b}$ に対し、 α ならびにh が大きくなれば加速電圧を大きくしなければならないことがわかる。また、SR光が光子 という形で放出されるため、確率的にシンクロトロン振動が大きくなり、r f バケットよ り逸脱することから決まってくる量子寿命は

$$\tau_{q} = \frac{\tau_{\varepsilon}}{2} \frac{e^{\varepsilon}}{\xi}$$

$$\xi = \frac{\bigtriangleup E^{2}_{max}}{2\sigma_{\varepsilon}^{2}}$$
(2.7-18)

となる。2) ここで

$$\tau_{\varepsilon} = 2 \text{ E T} / J_{\varepsilon} U \qquad (2.7-19)$$

と書いて τ_e はシンクロトロン振動のdamping timeを表す。十分長い量子寿命を得るため に、加速電圧を増やして \triangle Emax を大きくすればよいことがわかる。

2.7.2 RF加速システム³⁾

電子が磁場で偏向される際に、その運動エネルギーの一部をSR光として放出する。リング1周あたり1個の電子が放出するエネルギーは(2.7-20)式で与えられる。

$$U = \frac{4 \pi}{3} \frac{e^2}{\rho} \left(\frac{E}{mc^2}\right)^4 = 88.5 \times \frac{E^4 (GeV)}{\rho(m)} (keV) \quad (2.7-20)$$

従って、少なくともエネルギー損失を補給しないと電子は安定周回軌道より逸脱する。こ のエネルギー補給には、通常空胴に共振させた高周波電場を用いる。この電場のかかって いる部分を電子が通過する時のtransit timeは、加速電圧がそのtransit time内で変化し ないと見なせる程短くなくてはならない。この要求を満たす空胴は電極間隔の狭いリエン トラント型の空胴である。リエントラント型空胴は図2.7-1 に示すように同軸円筒形で、



図2.7-1 リエントラント型空胴の形状

加速電極が対向して配置されている構造であり、共振周波数 f 。はJ. C. Slatorにより与えられている。⁴⁾ L/2 点における電界、磁界の関係は、

$$V = 2 \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = 2 E_0 \ln \frac{r_2}{r_1} \sin \frac{\pi L f_0}{c}$$
(2.7-21)

$$I = \int_{0}^{2\pi} H_{\theta} d\theta = -2 \pi j \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_{0} \cos \frac{\pi L f_{0}}{c} \qquad (2.7-22)$$

で与えられる。空胴共振角周波数を ω 。とすると、Z = V/I, $1/j\omega$ 。 $C_a = Z$ 。より

$$\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{\mathbf{r}_2}{\mathbf{r}_1} \tan \frac{\pi \operatorname{L} \mathbf{f}_0}{\mathbf{c}} = \frac{1}{\operatorname{C}_2 \omega_0} \qquad (2.7-23)$$

さらにL < c/f₀を仮定してCa = π r² ϵ / D, 2 π f₀ / c = $\omega_0 \sqrt{\epsilon/\mu}$ の関係を用いると、

$$(2, 7-24)$$



となる。

空胴の製作に当たり以下の制約条件の下に寸法諸元を決定した。

2r': ビーム通路径はビーム入射時のベータトロン振幅、ビームサイズおよび閉軌道のず れを考慮して115 mm¢にとる。

2r1 :加速電極外径は電極壁の厚さ、冷却水通路を考えると180 mm φ となる。

2r2:ビーム周回軌道レベルはG.Lより1227mmである。空胴下部に設けられるバルブ、
 超高真空ポンプスペースを考慮して空胴内径500 mm Ø以下とする。

L :空胴を設置する直線部の長さは650 mmであり、空胴の前後にはベローとビームポ ジションモニタ(BPM) が取り付けられるので内のり幅400 mm以下とする。

リング周長13.256mmならびに制約条件を考慮して、ハーモニック数7 (共振周波数158.4 MHz)を採用した。空胴の寸法諸元を表2.7-1 に示す。

表2.7-1 空胴の寸法諸元

$2r_1(mm\phi)$	2r ₁ (mm¢)	2r₂ (mm¢)	L(mm)
115	180	468	. 389

(2.7-24) 式より加速電極間ギャップはD~16.6mmとなるが、実際には集中定数回路で 近似したために生ずる誤差や空胴本体に取り付けられている各種ポート類の影響等がある ので、f。=158.4MHzを得るためには加速電極間ギャップの調整が必要である。

製作した空胴を図2.7-2 に示す。空胴胴部ならびに側板ともに無酸素銅-ステンレス鋼 のクラッド板からなる。加速電極とチューニングプランジャーは無酸素銅で造られてい る。プランジャーは、ステッピィングモーターにより±40mmの範囲で駆動でき、±0.5 MHz の共振周波数の調整ができるようにしてある。加速電極は両側板から取りはずし可能 で、また片側の側板はフランジ構造であり胴部より切り離すことができる。電気的な接触 を良好とするために、加速電極と側板との間は、加速電極に設けられた溝に金コートした リン青銅製接点コイルをセットし、押え金具によりコンタクトをとっている。開閉フラン



図2.7-2 NIJI-Iの空胴断面図

ジと胴部の間では、面タッチの真空メタルシールがコンタクトの役割も兼ね備えている。 空胴の共振周波数は、空胴の温度変化によりずれる。空胴温度を可及的に一定とするた め温度制御を行う。加速電極と開閉フランジには、その内部に冷却水通路を設けてあり、 胴部と溶接側板には冷却用の半割れパイプを溶接する。冷却水温度は自動温度制御システ ムにより22±1℃以内に収まるようにコントロールしている。

+分な量子寿命を得るためには、 $\triangle E \max > 6 \sigma_{\epsilon}$ を満たすことが必要である。NIJI - IのパラメータE = 230MeV、 $\rho = 0.7 \text{ m}$ 、 $\alpha = 0.46$ 、h = 7 より(2.7-11)、(2.7-16) および(2.7-17)式を用いて加速電圧Vを計算すると2.9kVとなる。この種の低エネルギー リングの電子ビームの寿命はTouschek寿命に支配されると考えられるため、長寿命化を図 るには $\triangle E \max$ を大きくする方が望ましい。ここではVmax = 20 kVとして見積り、空胴 のシャントインピーダンスを1×10⁵Ωとして、r f 電源には2kW能力のものを製作した。

図2.7-3 にrf電源のブロック図を示す。増幅器は4 極管(TH298)を用いている。 rf電源出力は39D同軸導波管を用いて空胴へ伝送される。空胴へのrf入力はセラミッ ク窓を介して、入力ループと空胴の電磁結合により供給される。



図2.7-3 rf電源のブロックダイヤ グラム

2.7.3 空胴特性把握試験³⁾

空胴についての特性試験の対象となる事項は次のようなものである。

- (i) 共振周波数の調整
- (ii) Q値の測定
- (iii) 電場分布の測定
- (iv) シャントインピーダンスの測定
- (v) 入力インピーダンスの整合調整の確認
- (vi) 他モードの同定

(i) 共振周波数の調整

共振周波数の測定は、図2.7-4 に示すように方向性結合器に接続した標準信号発生器 (SG)の出力を空胴に伝送し、空胴に取り付けたサンプリングループからの出力電圧が 最大となる時の周波数を周波数カウンターで読みとる。



X 2. 7 - 4

共振周波数測定系の構成図

完成した空胴の加速電極間ギャップはD=19.72 mmであり、中心の共振周波数は大気 状態においてf₀=156.4MHzであったので、それをベーキングした後の真空状態において f₀=158.4 ±0.5MHzの範囲とするべく、数回にわたり加速電極の切削を行いギャップの 調整を行った。共振周波数の設定の過程で、(a)大気状態でのギャップ変化に対する共振 周波数の変化、(b)大気状態より真空状態にした時の共振周波数の変化、(c)真空ベーキ ング(約250℃,18時間)前後での共振周波数の変化に関して、以下の関係が得られた。

$$\triangle f(a) = 2.3 \text{ MHz/mm}$$
 (2.7-25)

実験式(2.7-25)で与えられる△fが、(2.7-24)式で計算されるギャップ変化に対する 共振周波数の変化4.4MHz/mmに比して小さいのは、近似精度と取り付けられている各種 ポートとのため、実機と理想モデルとが相違するためと考えられる。また、真空ベーキン グ前後の共振周波数の変化は、空胴製作時の溶接等による内部残留応力がベーキングによ り緩和されて生じるものと考えていたが、数回のベーキングにおいても共振周波数の変化 は同程度であった。このことから、ギャップ間隔調整後、フランジ再取付の際に、ボルト 締付けトルク管理を行っていたにもかかわらず、締付力のばらつきによる局部歪がベーキ ングにより緩和されているものと推察される。最終的には、ギャップ間隔D=20.84 mm において共振周波数範囲158.4 ±0.5MHzで動作することを確認した。図2.7-5 に測定結果 を示しておく。



図2.7-5 共振周波数測定結果 (ii) Q値の測定

測定原理

空胴のQ値は多くの場合、実測によって求められる。測定方法は以下に示す4方法に大別される。⁴⁾

① Transmission method

- 2 Impedance measurement
- ③ Transient decay or decrement method
- ④ Dynamic method

ここでは、一般に用いられる"Transmission method"を用いることとした。⁵⁾ 伝送線の 特性インピーダンスに等しい内部インピーダンスを持つSGと空胴および検出器を接続し た場合の等価回路は図2.7-6 で表すことができる。



図2.7-6
 空胴に標準信号発生器(S
 G)と検出器を接続したと
 きの等価回路

負荷時のQ(Q_L)は次式で定義できる。



(2.7 - 28)

従って、この等価回路のQ」は

$$Q_{L} = \frac{\omega_{0} L}{Rs + n_{1}^{2} Z_{1} + n_{2}^{2} Z_{2}}$$

あるいは、

$$Q_{L} = \frac{\omega_{0} L}{Rs + (\omega M_{1})^{2} / Z_{1} + (\omega M_{2})^{2} / Z_{2}}$$
(2.7-29)

で与えられる。

入力ループおよびサンプリングループの結合係数は

$$\beta_{1} = n_{1}^{2} \frac{Z_{1}}{R_{s}} = \frac{(\omega M_{1})^{2}}{R_{s} Z_{1}}$$

$$\beta_{2} = n_{2}^{2} \frac{Z_{2}}{R_{s}} = \frac{(\omega M_{2})^{2}}{R_{s} Z_{2}}$$
(2.7-30)
(2.7-31)

と書ける。 (2.7-29), (2.7-30) および (2.7-31) 式より、無負荷時のQ (Q₀) = $\omega L/R_s \ge Q_L の関係は、$

$$Q_{0} = Q_{1} (1 + \beta_{1} + \beta_{2})$$
 (2.7-32)

となる。 β_1 、 β_2 を独立に測定しうるならQ。を求めることができるが、通常は β_1 、 β_2 を小さくして行き、影響の出ない所で調べる。

共振曲線のバンド幅とQ₁の関係は次の様にして得られる。空胴の transmisson loss T(ω)は、SGより伝送される出力に対する空胴に分配される出力の比である。

$$T(\omega) = P_{L} / P_{0}$$
 (2.7-33)

図2.7-6 の等価回路を用いてP₁、P₀を算出し、T(ω)を求めると

T (
$$\omega$$
) = $\frac{4 \beta_1 \beta_2}{(1 + \beta_1 + \beta_2)^2 + 4 Q_0^2 \delta^2}$ (2.7-34)

となる。 δ をチューニングパラメータと呼び、 $\delta = (\omega - \omega_0)/\omega$ で定義する。共振点 $\delta = 0$ において、(2.7-34)式は

T (
$$\omega_{\circ}$$
) = $\frac{4 \beta_{1} \beta_{2}}{(1 + \beta_{1} + \beta_{2})^{2}}$ (2.7-35)

T (
$$\omega$$
) = $\frac{T (\omega_0)}{1 + 4 Q_L^2 \delta^2}$ (2.7-36)

となる。従って、half-powerとなる点は $2Q_{L}\delta = \pm 1$ のところである。すなわち、共振 周波数 f と共振曲線のhalf-powerとなるバンド幅 \triangle f より Q_{L} を測定することができる。

 $Q_{L} = f / \Delta f \qquad (2.7-37)$

② 測定方法および測定結果

Q_Lの測定は図2.7-4 に示した装置を用い、空胴に伝送するSGの周波数を変化させた 場合の空胴サンプリングループからの出力をそれぞれ周波数カウンター、オシロスコープ の出力電圧で読みとった。なお、サンプリングループの出力のhalf-powerとなる点は、共 振点における出力電圧Vpeak× $1/\sqrt{2}$ で与えられる。測定は次の手順に従って実施した。 (1)空胴内を大気状態とし、サンプリングループの結合係数 β_2 の影響が出なくなる程度

に小さくする (β_2 min)。この時、入力ループはclosed coupledとしておく。 (2) サンプリングループの結合係数を β_2 min とし、入力グループを closed coupled 状

態より回転させて、結合係数β₁を小さくして行き、共振曲線よりQ₁を求める。 (3)次に空胴内を真空状態とし、(2)と同様に真空におけるQ₁を求める。

図2.7-7 に大気および真空状態で測定した Q_1 を示す。入力ループの結合係数 β_1 が最も小さくなる点すなわち空胴の Q_0 をfitting により求めると

Q。(大気) ~ 8000

Q₀(真空) ~ 7200

となった。



図2.7-7
 大気および真空状態で測定
 したQ₁値、縦軸との交点
 がQ₀値である。

一方、リエントラント型の空胴のQ。の理論値は

$$1/Q_{0} = \delta \left[\frac{1/r_{1} + 1/r_{2}}{2 \ln r_{2}/r_{1}} + 1/L \right]$$
(2.7-38)

で与えられる。ここで δ は skin depthであり、 σ を導電率、 μ を透磁率とすれば

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \,\mu}} \tag{2.7-39}$$

と表せる。空胴の内面は無酸素銅で出来ており、 $\sigma = (1.7 \times 10^{-8})^{-1} / \Omega \cdot m$, $\mu = 4 \times 10^{-7} H / m$, f =158.4MHzとして (2.7-39) 式より $\delta = 5.2 \mu m$ と求まる。表2.7-1 に示した寸法諸元より

$$1/Q_0 = 0.0052 \times \left[\frac{1/90 + 1/234}{2 \times \ln 234/90} + \frac{1}{389} \right] \sim 18000$$

となる。これは理想的な空胴で得られる値であり、実際には空胴内面の表面仕上げ状態お よび各種ポート類の 3次元的影響により、Q。が40~44%に低下していることが確認でき た。

(iii) 電界分布の測定

測定原理

空胴内のビーム軸に沿う方向の電界分布を測定するには、Slatorの摂動理論⁶⁾として良く知られている様に、空胴の中に金属製のビーズを入れ、共振周波数の変化を位置の関数

として測定すれば良い。ビーズによる空胴の共振周波数の変化は、

$$\omega^{2} = \omega_{0}^{2} \left\{ \begin{array}{c} \mathrm{K} \quad \int (\mu \mathrm{H}^{2} - \varepsilon \mathrm{E}^{2}) \mathrm{d} \tau \\ 1 + \frac{\Delta \tau}{\Delta \tau} \\ & \int (\mu \mathrm{H}^{2} + \varepsilon \mathrm{E}^{2}) \mathrm{d} \mathrm{V} \end{array} \right\}$$
(2.7-40)

と与えられる。ここで、 ω 。は空胴本来の共振周波数、 ω は摂動を受けた時の共振周波数、 Kはビーズの形状に関係する因子(球形の場合はK=1)、 $\Delta \tau$ および Vはそれぞれビー ズの体積、空胴の体積である。ビーズによる摂動が小さいと、共振周波数の変化 $\delta = (\omega - \omega_0) / \omega_0$ の二次の項が無視でき、

$$\delta = \frac{K \int_{\Delta \tau} (\mu H^2 - \varepsilon E^2) d\tau}{2 \int_{V} (\mu H^2 + \varepsilon E^2) dV}$$
(2.7-41)

と表せる。加速電極部にはTMoin モードの波のみが存在するため、上式は

$$\delta = \frac{-\mathrm{K}\,\varepsilon\,\mathrm{E}^{\,2}\,\bigtriangleup\,\tau}{2\,\int_{\mathrm{V}}\,(\mu\,\mathrm{H}^{\,2}\,+\varepsilon\,\mathrm{E}^{\,2}\,)\,\mathrm{d}\,\mathrm{V}}$$
(2.7-42)

と書ける。従って、空胴への入力パワーを一定として、ビーズの位置を軸方向にずらせて 行った際の共振周波数の変化を測定することによって、加速電極近傍の加速に寄与する電 界分布を知ることができる。

② 測定方法および測定結果

空胴の軸方向の電界分布を測定する際には、電界強度の半径方向に沿う変化の影響を避けるため、ビーズの直径は可及的小さい方が望ましい。しかし、ビーズの体積をあまり小さくすると、(2.7-42)式より共振周波数の変化が小さくなり、測定が困難となる。そこで、直径13.1mm φ ならびに16.2mm φ の 2 種類の鉛製ビーズを用いた。

ビーズを加速電極の軸に沿って移動させるためには、何らかの形で保持することが必要である。このためにビーズの中心軸の穴に木綿糸を通して、糸の一方には重りを取り付け

て一方から他方へ移動させる。糸に目印をつけてその移動する長さを読めばビーズの位置 がわかる。共振周波数の測定には、図2.7-4 と同様の装置を用いた。空胴内に木綿糸を張 ったとき、糸の誘電率のために共振周波数の測定値は僅かに小さくなるが、その変化は極 めて小さく、測定誤差に比べて無視出来る。

図2.7-8 はビーズ直径13.1mm φの場合の測定結果である。△rはビーム中心軸から半 径方向への距離、またzはビーム軸上で加速電極ギャップ中心からの距離を示している。 加速電極ギャップ中心近傍の電界は、ビームを加速するのに有効な分布となっていること が確認できた。



⊠2. 7-8

電界分布、 z はビーム軸上 で加速電極ギャップ中心か らの距離、△ r はビーム軸 から半径方向への距離を表 す。

(iv) シャントインピーダンスの測定 シャントインピーダンスR snは

$$R_{sh} = \frac{(加速電圧)^2}{空胴に消費される電力} = \frac{V^2}{P}$$
 (2.7-43)

と定義され、またQ。値は

$$Q_{0} = \frac{2\pi \times \exists \lambda \forall X = \frac{\pi}{2\pi}}{1 \exists x \forall x = 1} = \frac{\omega W}{P}$$
(2.7-44)

で表されるので

$$\frac{\mathbf{R}_{sh}}{\mathbf{Q}_0} = \frac{\mathbf{V}^2}{\omega \mathbf{W}}$$
(2.7-45)

のように空胴の構造のみによるR_{sh}/Q₀と空胴内表面の状態および材質に関係するQ₀ に分離することができる。R_{sh}/Q₀を求めるには、電界分布測定と同様にビーズ摂動法 が適用できる。⁵⁾ 共振周波数のずれ△fを用いると

$$\frac{\mathbf{R}_{sh}}{\mathbf{Q}_{0}} = \left\{ \int \sqrt{\frac{\bigtriangleup f}{\bigtriangleup fm}} \, \mathrm{d} \, z \right\}^{2} \frac{120 \, \lambda}{\mathbf{k} \, \mathbf{f}} \frac{\bigtriangleup fm}{\bigtriangleup \tau}$$
(2.7-46)

と書ける。ここで \triangle fmはビーム軸上の最大の \triangle fであり、f、 λ は空胴本来の共振周波数 および波長、 $\triangle \tau$ はビーズの体積である。

測定には直径16.2mm ϕ のビーズを用いた。図2.7-9 にビーム軸上での $\sqrt{\Delta f}/{\Delta fm}$ の変化を示す。空胴のシャントインピーダンスR_{sh}はビーズの体積を零に近づけて行くことに



図2.7-9 加速電極ギャップ中心から の距離zに対する $\sqrt{\Delta f/\Delta fm}$ の測定結果

より求められるが、 $\Delta \tau を減少させて行くと f = 158.4 MHz であるため<math>\Delta f$ の変化が減少し、 測定精度が悪くなる。そこで、 $\Delta \tau = 2.23 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ (16.2 mm ϕ のビーズ体積)の時の シャントインピーダンスを求めた。図の積分値と真空状態のQ₀ = 7200を用いて (2.7– 46) 式よりR₅,~1.2MΩが得られた。

r f 電源から供給可能な電力は 2kWであるので、空胴内に励起される最大加速電圧V $kV = \sqrt{2 PR_{sh}}$ で与えられV~70kVとなる。

またシャントインピーダンスは、蓄積ビームのシンクロトロン振動の周波数を観測する

-55-

ことにより評価できる。(2.7-9)式より求まる加速電圧Vに対して、R_{sh}は次式の形で 与えられる。

$$R_{sh} = \frac{V^2}{P - I U}$$
(2.7-47)

ここで、Pはrf電源から空胴に供給される有効電力であり、Iは蓄積電流、Uは放射損 失である。

(V)入力インピーダンスの整合調整

r f 電源より供給される電流を I g、蓄積ビーム電流を I とすると、空胴の等価回路は 図2.7-10で表される。そこで



$$\mathbf{j} \ \omega \mathbf{C}_{0} \ \mathbf{V} + \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{j} \ \omega \mathbf{L}_{0}} + \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{R}} = \mathbf{I}_{s} + \mathbf{I}$$
(2.7-48)

となる。いま $\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$ であるので、上式は

$$\left\{ j \left[\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right] + \frac{1}{R \omega_0 C} \right\} V = \omega_0 L (I_s + I) \qquad (2.7-49)$$

となり、右辺のω₀Lは電流が作る磁場の電磁誘導による電圧と見なせる。 Q₀の定義より

$$\left\{ j \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) + \frac{1}{Q_0} \right\} V = \frac{R}{Q_0} (I_s + I)$$
 (2.7-50)

-56-

書ける。導波管の特性インピーダンスを乙。とし、入力側よりみたQexには

$$\frac{1}{Q_{0xt}} = \frac{1}{Z_0} \frac{R}{Q_0}$$
(2.7-51)

となる。ここで入力部の結合係数β,を

$$\beta_{1} = \frac{Q_{0}}{Q_{ext}}$$
(2.7-52)

とすれば、

$$\beta_1 = \frac{R}{Z_0} \tag{2.7-53}$$

となる。

いま I = 0の時の入力インピーダンスは、(2.7-50)および(2.7-53)式より

$$\frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}_{g}} = \frac{\beta_{1} \mathbf{Z}_{0}}{1 + \mathbf{j} \mathbf{Q}_{0} \left(\frac{\omega}{\omega_{0}} - \frac{\omega_{0}}{\omega}\right)}$$
(2.7-54)

で与えられ、 $\omega = \omega_0$ のとき入力インピーダンスは β_1 Z₀となる。すなわち、導波管と 空胴との整合をとるためには β_1 を1に設定しておけば良い。しかし、電子エネルギーの 高い電子蓄積リングに大電流を蓄積する場合には、ビームローディングのために β_1 =1 では整合がとれず、空胴から電源側に反射電力が戻ることになる。ビームローディングが ある場合、 β_1 と同調角を適当に決めれば反射を無くすことができる。⁷⁾同調角は自動同 調装置により調整可能であるが、結合係数 β_1 は高周波電力を供給した状態では変化させ ることはできない。そこで、I=0 の時の反射電力とIの設計値(最大)の時の反射電 力が等しくなるように β_1 を決めておけば、その範囲のIにおいては、より小さい反射電 力となる。空胴の加速電圧Vとするのに必要な電源の電力P₆は

$$P_{g} = \frac{(1+\beta_{1})^{2}}{4\beta_{1}} \cdot \frac{\{V + (IR_{sh}/1+\beta) \cdot \cos \phi\}^{2}}{R_{sh}}$$
(2.7-55)

で与えられる。一方、反射電力Prは

 $P_{r} = P_{g} - P_{c} - P_{b}$ (2.7-56)

ここで、P。は空胴壁ロスを、P。はビームに供給される電力を表し、 それぞれ

$$P_{c} = \frac{V^{2}}{R_{sh}}$$
, $P_{b} = I V \cos \phi = I \frac{U}{e}$ (2.7-57)

で与えられる。

NIJJ-Iの場合、最大電子エネルギー230MeV, I=200mA, V=20kV, R_{sh}= 1.2 MΩ, U₀ =0.35KeVとすると、リングの電子エネルギーが低いので、ビームローデ ィングの影響はほとんど無視でき、 β =1, P_g ~ 650Wとなる。そこで、入力インピー ダンスは導波管の特性インピーダンスZ₀=50Ωと等しくなるように、ネットワークアナ ライザーを用いて入力ループの角度調整を行った。

(vi) 他モードの同定

電子の加速に用いる高周波は、158.4MHzが基本波であるが、空胴にはその高調波および 変形モードが存在すると考えられる。図2.7-11にrf電源からP。=0.75kWを入力して、 サンプリングループよりの周波数スペクトラムをスペクトラムアナライザーを用いて観測



図2.7-11 サンプリングループを用い て検出した周波数スペクト ラムの測定結果、中心周波 数500MHz,200MHz/div

した結果を示す。1 GHz までの測定で高調波モードとしては第5 調波まで確認されている。 この他に、105.6MHzと128.4MHz付近に変形モードと考えられるモードが存在する。これら のモードが蓄積ビームと相互作用を起こすことも予想される。詳細には入射蓄積実験を行 い確かめることにした。

2.7.4 空胴の真空状態とパワー投入試験

各種特性パラメータの調整および測定のために、空胴を何度となく大気にさらしたり、 加速電極の機械加工を行ったので、パワーテストの前にフレオン113とエチルアルコール で内面洗浄を行った。

その後、ロータリーポンプ(150 ℓ/\min)とターボ分子ポンプ(160 ℓ/s)から成る粗引 真空系で、真空度は2.8×10⁻⁸Torrに到達した。この時点で、四重極質量分析計により残 留ガス成分を調ベリークチエックを行った。図2.7-12(a) に示すように、その主成分はH₂ でその他H₂O, CO, CO₂ が認められるが、N₂, O₂ は検出されずリークのないこと が確認できた。引き続き、約200 °C、18時間のベーキングの後、スパッタイオンポンプ (500 ℓ/s)とチタンゲッターポンプ(750 ℓ/s)を作動せることにより、真空度は1.1×10⁻⁹ Torrに到達し、真空状態は良好であった。残留ガス成分を図2.7-12(b) に示す。H₂ は約 1/20、H₂O, CO, CO₂ は約1/10に低減していることがわかる。しかし、電力を伝送 しはじめた当初は、空胴にほとんど電力が入らず、反射電力のみが増大したり、低電力供 給が可能となった以後も放電と考えられる突発的な反射電力の増大がみられた。この原因 は、加速電極ギャップで放電の生じる電圧(計算値)が1.2kV以下であることから、マル チパクタリング現象^{®)}であると判明した。十分なエージングを施こした後に、パワー投入 が可能となった。

図2.7-12(c)は0.5kWの電力を投入した場合の残留ガス成分を示しており、ベーキング 等で除去されない一部の吸着水分および溶剤からのC₂H₄の放出が認められる。

フルパワー投入試験が終了した後、直ちにこの空胴をリングに組み込んだ。



図2.7-12 残留ガススペクトル (a) P=2.8 × 10⁻⁸Torr (b) P=1.1 × 10⁻⁹Torr (c) P=1.1 × 10⁻⁹Torr r f投入 (P_s=0.5kW)

2.8 真空系

低エネルギーで大電流を蓄積するために最も重要であるのは、蓄積ビームの寿命特性の 評価である。この特性は主としてTouschek寿命により定まると予想されるが、蓄積初期に おいてはSR光に照射された真空ダクト壁面からの光電子放出があり、真空系内の圧力上 昇を起こし寿命を短くする。低エネルギーになるにつれて放出ガスは減少するが、真空の 枯れに長期間のビーム蓄積運転が必要となると考えられる。更に、真空ダクト内の中性ガ ス分子密度は蓄積ビーム寿命を短縮しない程に十分低いものであっても、蓄積ビームにト ラップされるイオンとビームの相互作用により、あたかも真空が悪くなったかのように寿 命の短縮が起こる。低エネルギー入射では、イオンの発生をいかにして抑え、いかにして 除去するかが重要な課題となるため第4章 4.2節で詳しく議論する。

本節ではNIJI-Iの排気系ならびに低エネルギーにおける真空の枯れ状況を示す蓄 積電流・時間積と圧力上昇の関係について述べる。

2.8.1 中性ガス分子による散乱

中性ガス分子との衝突による蓄積ビームの寿命 r 。(s) は理論的に次式で与えられる。

 $1 / \tau_{\rm P} = 9.6 \times 10^{26} \sigma_{\rm t} P$ (2.8-1)

ここで σ_{ι} (cm)、P(Torr)はビーム損失を起こす散乱断面積およびガス圧力である。 散乱断面積として以下の三種類が考えられる。^{1) 2)}

(1) クーロン弾性散乱

蓄積電子が中性ガス分子の原子核のクーロン場によって偏向を受け、その偏向角が大き い場合は真空ダクトに衝突することにより失われる。クーロン散乱断面積は

 $\sigma_{1} = 4\pi r_{0}^{2} z^{2} / \gamma^{2} \theta_{c}^{2}$ $\theta_{c}^{2} = (a/2)^{2} (1 + \alpha^{2}) / \beta_{max} \beta_{ay}$ (2.8-2)

で与えられる。ここでr₀は電子の古典半径、z は中性ガスの原子番号、a は真空ダクトの 最小開口、 β 、 α は垂直方向のツイスパラメータ、 γ はローレンツ因子である。

(2) 制動輻射による非弾性散乱

蓄積電子が中性ガス分子の原子核のクーロン場内で偏向を受ける時、制動輻射によりそのエネルギーの一部を失うが、このエネルギーがrf系によって決まる臨界値以上であれば

リングの閉軌道より失われてしまう。制動輻射による散乱断面積は

$$\sigma_{2} = (4/137) r_{0}^{2} z^{2} \ln (183/z^{1/3}) \ln (E/\Delta E_{max})$$
(2.8-3)

で与えられる。ここで $\Delta E_{max} / E$ はrfバケット高さである。

(3) 殻外電子との衝突による非弾性散乱

蓄積電子が中性ガス分子内の殻外電子と衝突する結果、エネルギーを失い、この散乱断 面積は

 $\sigma_{3} = 2\pi r_{0}^{2} z^{2} (E_{0} / \Delta E_{max})$ (2.8-4)

で与えられる。Eoは電子の静止エネルギーである。

実際のリングの超高真空系内に存在する中性ガス分子の主成分はH₂およびCOである。 そこで、蓄積ビームの寿命に関しては分子量の大きいCOに着目すればよい。NIJI-I のパラメータ< β_{av} >~1.34, a =38mm, γ = 320、 ΔE_{max} /E =5.5 × 10⁻³を用 いると各散乱断面積は

$$\sigma_{1} = 5.0 \times 10^{-24} (cm^{2})$$

$$\sigma_{2} = 7.4 \times 10^{-24} (cm^{2})$$

$$\sigma_{3} = 4.6 \times 10^{-24} (cm^{2})$$
(2.8-5)

となる。従って、全散乱断面積は $\sigma_{+}=17\times10^{-24}$ (cm²)である。それゆえ、24時間 程度の蓄積ビーム寿命を得るためには、(2.8-1)式より P=1×10⁻⁹ Torr 以下でなけれ ばならない。

2.8.2 ガス放出

電子蓄積リングの真空系における放出ガスの大部分は、SR光が真空ダクト壁を照射す るために発生する。SR光によるガス放出には気体分子の放出(光脱離)と熱的な気体分 子の放出(熱脱離)がある。光脱離はSR光による光刺激脱離と発生した光電子による電 子衝撃脱離とから成っている。後者の脱離機構として、光子や光電子がダクトを照射する ことにより表面近傍にホールが生成され、吸着に寄与している電子がこのホールに落ち 込むため、吸着気体分子の結合力が弱まり表面より脱離するというモデルが支持されてい る。³⁾更に、リング内では磁場が存在するため、光電子は発生点近傍をドリフトし吸着気
体分子を電子衝撃脱離させる割合が大きくなるものと考えられている。

光脱離によるガス放出率は、

$$Q_{\rm SR}(\text{Torr} \cdot \ell/s) = 1.45 \times 10^{-2} \gamma I \eta \{1 - (\varepsilon_{\rm D}/\varepsilon_{\rm C})^{-1/3}\}$$
(2.8-6)

ここで、I (A)は蓄積ビーム電流、 ε_{D} (~ 10eV)は光電子放出の閾値エネルギー、 ε_{c} は SR光の臨界エネルギーである。脱ガス係数 η は一個の光子により放出される分子の数で あり、枯れたステンレス鋼に対して η (molecules/photon)~2.5 × 10⁻⁶である。⁴⁾ 従って、 $\gamma = 460$, I = 0.2 Aの時、 $\varepsilon_{c} = 38.6$ eV、ガス放出率 Q_{SR}~1.2 × 10⁻⁶ (Torr • ℓ /s) となる。

熱脱離によるガス放出量は、直線部もSR光に照射されるものとすれば真空ダクト内の 内表面積に比例する。rf加速空胴部を除く真空ダクト表面積は S~ 4×10⁴ (cm²)であ る。200℃で数時間ベークされたステンレス鋼の放出ガス率 q=5×10⁻¹²(Torr ℓ/scm²) を用いてQth =Sq ~ 2×10⁻⁷ (Torr • ℓ/s) となる。 ゆえに、 E= 230 Me Vで P= 1×10^{-9} Torrの到達圧力を得るためには約1400ℓ/sの排気能力が必要となる。しかし、脱 ガス係数ηは真空ダクトの履歴に左右され、初めてビームを蓄積した時はη = 1程度であ るのに対し、光脱離により系内が清浄になるとη~10⁻⁶程度にまで減少する。すなわち蓄 積電流当りの放出ガスが6桁も変化する。従って、早期に所定の性能を発揮することが望 まれる産業用小型光源では、動作状態での圧力を確保するために要する労力を最小にする 方策について見通しを得ておくことが重要である。

2.8.3 ダクト、排気系構成

真空ダクトは偏向電磁石部ダクト、4極電磁石部ダクトおよび入射電磁石用チェンバー に大別される。材質は SUS304 である。偏向電磁石部ダクトは有効アパーチャーを最大に するため、偏向電磁石のビーム中心軌道に対応した曲率 ρ = 0.7 mを持たせた。小型電子 蓄積リングでは、SR光は偏向部に照射されるから、ダクトからの放出ガスを偏向部外側 に導き、効率よく排気するためのポンプ構成を採用した。偏向電磁石部ダクトならびに偏 向部ポンプ配置を図2.8-1,図2.8-2 に示す。4極電磁石部ダクトの構造もビームに対す るアパーチャーをできるだけ大きくするための構造になっている。4極電磁石部ダクトの 断面形状を図2.8-3 に示す。入射電磁石用チェンバーおよびrf空胴と4極電磁石ダクトの 接続部の片側には、ベーキング処理に伴う熱伸縮や機械的歪みを吸収するためのベローズ



図2.8-1 偏向電磁石部ダクトの形状



図2.8-2 偏向電磁石部ポンプ配置図、 SIP:スパッタイオンポンプ、 TGP:チタンゲッターポンプ

が設けてある。

図2.8-4 にNIJI-Iの排気系を示す。粗排気系として 160 ℓ /sターボ分子ポンプと ロータリーポンプ 135 ℓ /minを直結して用いた。粗排気系の組み込み位置は、セプタムチ ェンバーとキッカーチェンバーの2箇所であり、ターボ分子ポンプと超高真空系との分離 にはメタルバルブを用いている。



図2.8-34極電磁石部ダクト形状



図2.8-4 NIJI-Iの排気系、SIP: スパッタイオンポンプ、TGP: チタンゲッターポンプ、TMP: ターボ分子ポンプ、IG: 熱陰 極ゲージ

主排気ポンプは偏向電磁石部ダクト、セプタムチェンバー、キッカーチェンバーおよび rf空胴に接続したイオンポンプとチタンゲッターポンプである。それぞれの排気速度はN₂ ガスに対し、10⁻⁷ Torr の圧力の時、約2500 ℓ /sおよび約7000 ℓ /sである。

真空ダクトの約 200℃、8時間のベーキング処理のため、偏向電磁石部ダクトは直接通 電で加熱し、その他のダクトにはシーズヒーターやテープヒーターを組み込んだ。直接通 電をする場合、ダクトの1箇所を絶縁する必要があるため、薄いセラミックスを接合した ベローズを製作した。焼出し電力密度は約1.5 kW/mで200 ℃の加熱ができる。偏向電 磁石部ダクトと偏向電磁石のポールピースの間には絶縁と断熱を兼ねて 100 µ m ポリイミ ドフィルムを3 層巻きし、ポールピースの伝熱を極力抑えるため雲母シートを局部的に挿 入した。4 極電磁石部ダクトと入射電磁石チェンバーには輻射熱の遮断と均温化を考慮し てアルミニウムフォイルを巻いた。

真空計測には、熱陰極ゲージ(B-Aゲージ)を4台組み込んでいる。SR光による迷 光や光電子の影響で測定異常が生じないように、L字管を使用してその内にゲージを収納 している。

2.8.4 真空特性

運転時間の経過と蓄積電流減衰率 -di/dt ならびにリング内ガス圧力 Pの関係を概観す る。1986年8月~11月の典型的なデータを図 2.8-5に示す。電子エネルギーはE= 163 MeVである。I の小さい場合、ΔP も小さく、従って -dI/dt への真空の寄与はほぼ



X 2. 8-5

SR光によるガス放出の減 少につれて蓄積電流減衰率 および真空度が改善されて ゆく様子、1986年8月から 11月のデータを示してある。

ベース圧力で決まっていると考えて良い。一方、Iが大きい場合、SR光による ΔP も大きくなる。運転時間が長くなるにつれて、SR光照射によって放出ガスが少なくなる傾向にあることは明瞭である。NIJI-Iの運転が開始されて以来の圧力上昇 $\Delta P/I$ (Torr/mA)の変化を蓄積ビーム電流・時間積 D(mA・h)の関数として示したのが図2.8-6 である。 $\Delta P/I$ のDの依存性は

(2.8-7)

で表される。低エネルギーリングであるために、 $\Delta P/I$ の値および減少勾配が小さくなっ ていると考えられる。すなわち、低エネルギーの場合 ΔP は小さく、ビーム寿命に与える 影響は小さいことがわかる。一方、実用機に要求される 600-700 MeVまでエネルギーを 上昇させる場合 $\Delta P/I$ は大きくなる。従って、Dにもエネルギー依存性が存在し、勾配が 大きくなることが予想される。 KEK-PFの例では、 運転開始当初は $\Delta P/I$ は 10⁻⁸ (Torr /mA)まで上昇しており、100mAの時のリング内平均圧力は10⁻⁶Torr領域であった。 D=10⁴ (mA・h)後、10⁻⁸Torr領域まで減少しており、 $\Delta P/I \propto D^{-0.8}$ の関係で減少傾向 にあることが報告されている。⁵⁾電子エネルギーが高い場合、勾配は大きくなるが $\Delta P/I$ も大となるため、所定の動作圧力を得るためには長期間のビーム蓄積運転が必要となる。



図2.8-6 蓄積ビーム電流・時間積と蓄積ビームによる圧力上昇の関係

これを解決するためには、一つは真空ダクトを多室構造にすることである。ビームの周 回する真空ダクトとSR光の吸収される部所とを真空的に切り離す構造、すなわちビーム 周回ダクト、SR光ダンプ室、更にその中間にもう1室を設ければSR光によるガス放出 の影響がビームダクトに及ぶのを避けることができる。もう一つは、予めSR光に代わる 方法(例えば電子ビーム洗浄、アルゴン放電洗浄)で真空ダクト内面の洗浄をするなどの 対策を講じることである。

2.9 ビームトランスポート系

NIJI-Iの入射ビームトランスポートラインは、電総研リニアックから約26mあり、 80~160 MeVまでのエネルギーの電子ビームを輸送する。この節では、リングへ低エネル ギー電子を効率よくトランスポートするライン構成に関する考察およびビームトランスポ ート実験結果について述べる。

2.9.1 ビームトランスポートラインの構成

このリニアックは、ビームを利用する研究者の要請を満たしうるように、低、中、高エ ネルギー部より加速器室の周りに配置されている5実験室に同時にビームを振り分けるこ とができる。そのために、電総研で開発されたパルス振り分けシステム¹¹を用いて効率的 かつ経済的な運転がなされている。NIJI-Iは中エネルギー実験室に設置されており、 そのビームトランスポートラインの全体図を図2.9-1 に示す。リニアックは 50ppsで運転 されており、ビームの取り出しはトランスポートするビームのエネルギーに応じて50/2ⁿ pps(n = 2 - 5)の頻度から選択できるが、初期の160 MeV電子入射においては、ベータ トロン放射減衰時間を考慮して n= 4 すなわち16パルスについて1パルスとした。パル ス偏向コイルPにより6°の角度で取り出されたビームは、偏向半径 1.104 mの偏向電 磁石 DM₁および DM₂でそれぞれ42°曲げられる。 DM₁, DM₂ とも11.7°のエッジフォー カスを使用したのは、等価的にn値 0.5を得るためである。4 極電磁石はボア半径7 c m のシングレット(QE)と4 c mのダブレット(Q₁-Q₃)の2種類を用い、さらに電磁石の 設置誤差を補正するためのステアリングコイル(STC₁-STC₅)を設置した。

ライン構成上重要となるのは、モーメンタムの拡がりを持っているビームを DM₁, DM₂ で曲げることにより生じるビームサイズの拡がりを補正し、またトランスポートされてき たビームのリング入口における位相平面上の形をリング内のビームの形とマッチングがと れるように、4極電磁石の配置ならびに収束力を決定することである。

リニアックから取り出されたビームの中心エネルギーEからΔEだけずれた電子は、偏 向電磁石により偏向面内で中心軌道からΔxずれることになる。エネルギー分散関数 ηを



 図2.9-1
 トランスポートラインの全体図、P:パルス偏向コイル、DM_{1,2}:偏向電磁石,QE:シングレット、Q₁₋₃: ダブレット、STC₁₋₅:ステアリングコイル、BPM_{1,2}: ビーム位置モニター(セラミック蛍光板)

用いて

$$\Delta x = \eta \frac{\Delta E}{F}$$

(2.9-1)

と表す。ビームトランスポートラインでは、DM₂の出口で η および η 'が零(アクロマテ イック条件)となるように、QEの位置とk 値を決めることが出来る。しかし、QEは垂直 方向に発散力を持つこと、および輸送するビームエネルギーを変化(DM₁で Δ x が変化 する。)させても、QEの位置を変えることなく、対応可能なようにPとDM₁の間にダブレ ットQ₁を設置する。図2.9-2 には DM₂の後でアクロマティック条件が成立するように設計 した計算機シミュレーション結果を示す。 図の分布を与える QE, Q₁の収束力は、K_{QE}= 2.55m⁻², K_{Q1 (F)} =1.66m⁻², K_{Q1 (D)} =2.00m⁻²である。下流側のダブレットQ₂, Q₃



図2.9-2 アクロマティック条件 (n=n'=0)を満たす 計算機シミュレーション 結果 は、リングへの入射点においてベータトロン関数のミスマッチングをできるだけ低減する ために用いる。次に、このミスマッチングの入射効率に及ぼす影響について言及する。

図2.9-3 のようにトランスポート出口でのツイスパラメータ $\beta_{\iota}, \alpha_{\iota} (=-1/2 \cdot d\beta/ds),$ $\gamma_{\iota} (= (1 + \alpha^2) / \beta) とリング入口でのリング側のツイスパラメータ (<math>\beta_{R}, \alpha_{R}, \gamma_{R}$) がマッチング ($\beta_{\iota} = \beta_{R}, \alpha_{\iota} = \alpha_{R}, \gamma_{\iota} = \gamma_{R}$) している場合は、入射ビームのエミッタンス (@の面積) はリング内に入っても保存され、変形されたリング軌道の初期エミッタンス (@で表される) も設計通りとなる。ところがミスマッチングの場合は、入射ビーム(b) はリング内では(@)と相似な(b) に内接しながら回転する。すなわち



図2.9-3 リングの入射点における水平方向位相空間(1)入射時(2)キッカー減衰後を表す。

入射ビームのエミッタンスが ⓑ→ⓑ へ増加したように振る舞い、入射時初期エミッタン スもA→®で表されるように増加したと見なせる。このことにより、入射ビームはセプタ ムの真空隔壁にあたったり、その他の真空ダクトにあたる可能性が増し、入射効率を下げ る原因にもなる。垂直方向についても、同様にエミッタンスが増大することになり、ビー ムをロスする可能性が生じる。以上のようにトランスポートラインのツイスパラメータは リングとできるだけマッチングさせることが望ましいことがわかる。

リニアックからのビーム特性としてエネルギー、ビームサイズ(半幅)とエネルギー幅を

E = 160 (MeV)

X = Z = 2.0 [mm], X' = Z' = 1.0 [mrad]

 $\Delta E/E = 2$ [%]

と仮定して計算してみると、ビームサイズがライン途中であまり大きくならないという条件のもとで、Q₂,Q₃のダブレット2組によってマッチングをとることは容易ではないが、 得られた比較的好ましいビームサイズの分布を図2.9-4 に示しておく。



これまで述べてきた事柄はトランスポートライン構成の設計指針を与えるものである。 しかしながら、ビームトランスポート途中のビームサイズは、リニアックのオプティクス に非常に依存するばかりでなく、パルス偏向コイルが鞍型空芯コイルであるため、この磁 場の不均一性に大きく影響されることに注意しなければならない。一方、リングへの入射 窓に用いられているポリイミド膜(厚さ50μm)によっても1mrad程度のビーム散乱 が生じる。²⁾ 従って、ともかくビームを安定に通すということを基本にビームトランスポ ート試験を行った。トランスポートラインの微調は、リングへのビーム入射効率の良否を 確かめて行うことになる。

2.9.2 ビームトランスポート試験

ビームトランスポートの調整は、まず上流にあるプロファイルモニターおよびファラデ ィカップより始め、電磁石の電流を変えてビームの位置を正しながら下流へ最大のビーム 電流が通過するようにする。リニアックビームはパルス幅0.5 μ s、エネルギー160 MeV、 ピーク電流~100mA、繰り返し頻度3ppsである。ビームの位置・プロファイルの観測の ために、DM₁ および DM₂の直後にビームの遷移放射(Transition Radiation)を見るため のTi膜(50μ m厚)を挿入した。³)更に高い感度の必要な下流側には、図2.9-1 にBPM₁. BPM₂ と示したセラミック螢光板⁴) (Desmarquest 社製 AF 995R, $1.0 \times 50 \times 50$ mm) をビームに対して45[°] の傾斜を持たせて挿入し、TVカメラを90[°] 方向に配し、蛍光板上 でのビームスポットをモニターテレビで監視できるようにした。

なお、トランスポートラインのみの最終調整時には、セプタム真空槽の直前に設けたビー ム出射窓 (Ti膜, 50μm)に塩化ビニルシートをはりつけ、ビーム像を焼き付け記録した。 図2.9-5 にビーム像の観測結果を示す。水平方向7.4 mm、垂直方向2.4 mmの良く収束



図2.9-5 塩化ビニルシートに焼き付 けたビーム像

されたビームであり、設計ビーム軌道に一致している。しかし、この試験結果で得られた 各4極電磁石の収束力は $k_{QE}=2.12m^{-2}$, $k_{Q1}(P) = 0.51 m^{-2}$, $K_{Q1}(D) = -0.38m^{-2}$, $K_{Q2}(P) = 0.32 m^{-2}$, $k_{Q2}(D) = -0.26 m^{-2}$, $k_{Q3}(P) = 0.19 m^{-2}$, $k_{Q3}(D) = -0.16m^{-2}$ であり、図2.9-4 で与えた各4極電磁石の収束力とは大幅に異なっている。こ の原因は明白で、リニアックビームの質を改善し、パルス偏向コイルの磁場の均一性を向 上させれば解決すると考えられる。また、ビームトランスポートの状況はおおよそ以下の ようである。ビームのトランスポート効率はリニアックからのビームの状態によって異な るが、出射窓の後に配置したファラデイカップで測定した効率は10~20%程度である。ビ ームロスはほとんど DM₁ - DM₂のエネルギー分散関数の大きい所で起きている。つまり、 主にエネルギーの拡がりのためにビームをロスしている。その他の要因としては、オプテ ィクスのミスマッチングやエミッタンス等に依っているのではないかと考えられる。

2.10 む す び

SR光源の小型化を図る上での基礎研究課題である電子入射器の小型化、電子入射の効率化ならびに電子蓄積リングの直線部の短縮の目処を得るために、世界で初めて低エネル ギー入射研究用の小型電子蓄積リングNIJI-Iを開発した。

本章では、リング設計に関する基本的な面での考察およびプロトタイプリングシステム として各構成要素の諸特性を求め考察を加えた。 これらの結果を要約すれば、次の通りである。

- X線リソグラフィ光源として、スループットと解像線幅を満足するリングパラメー タは、超電導電磁石を用いる場合、電子エネルギー 600-700MeV、蓄積電流 200-300mA、ビームサイズ(標準偏差) 1-2mmであることを明らかにした。その 結果、低エネルギー入射により達成すべき蓄積電流の目標を判断する基となり得た。
 - 2)電子蓄積リングを小型化するためのラティス構成について検討した。偏向電磁石 に収束力を持たせた弱収れん方式とし、モーメンタムコンパクションファクターを 大きくすることにより、低エネルギーのビーム寿命を長くすることができる。また 直線部に設置する4極電磁石の数を低減できるため、直線部の短縮に寄与すること を示した。
- 3)リング入射系の基礎特性を把握するために、光ファイバ磁界センサを用いてパルス 磁場測定を行った。その結果は計算機シミュレーション結果と良い一致を示した。 従来のサーチコイルによる磁場測定に比し、空間分解能が高く、電気ノイズの影響 も少ないことがわかり、本法の実用性を確認した。
- 4)電磁石系に関しては、偏向電磁石のポールピース間隙は51.7mmであり、n値を0.5 に設定するために水平面に対し1.057 °の傾斜をつけて仕上げている。その結果n =0.47という特性を得、入射電子の最大振幅±40mmの範囲でn値が一様性を有す ることが確認された。また個々の電磁石の磁場値の偏差は0.3 %という小さい値で あった。
- 5) rf加速系においては、空胴の共振周波数、Q値、シャントインピーダンスについて 3次元的効果が表れる。この効果を見込んだ空胴の設計ならびに製作に対し、有用 な基礎データを得ることができた。
- 6)低エネルギー入射の場合、SR光による内面洗浄の進みが極めて遅いことが判った。 実用機においては、真空ダクトを多室構造にしたり、初期運転の段階より入射エネ ルギーから蓄積エネルギーまでエネルギーを上昇させ、内面洗浄を早く進めること が必要であるとともに、予めSR光にかわる方法で真空ダクトの洗浄をするなどの 対策が重要な課題となることを示した。
- 7)トランスポートラインの設計指針を与え、ベータトロン関数ならびにビームサイズ に関する計算機シミュレーションを行った。時間的な制約のため計算結果と対応さ せる本格的な試験は行えなかったが、既存のラインの改良すべき点を明らかにした。

ビームのトランスポート効率は10~20%と必ずしも満足のゆくものではないが、リングへの入射実験を行う上で大きな制約とはならないと考えられる。

参考文献

- 2.1節
 - 1) U. Trinks and F. Nolden, Nucl. Instrum. Method. 200, 475(1982).
 - 2) A. Heuberger, Proc. SPIE 448, 8(1983).
 - 3) W.-D. Klotz et al., Proc. Int. Cryogenic Engineering Conf., Berlin, 97 (1986).
 - 4) E. Weihreter, private communication.
 - 5) T. Tomimasu, J. Electronic Engineering 23, 6, 72(1986).
 - 6) H. Takada, K. Furukawa and T. Tomimasu, Proc. SPIE 257(1987).
 - 7) M. L. Knotek et al., Brookhaven National Laboratory Report 52005(1986).
 - 8) N. Takahashi. Nucl. Instrum. Method. B24/25, 425(1987).
 - 9) H. Takada, K. Furukawa and T. Tomimasu, Opt. Eng., 27, 550(1988).
- 2.2節
 - 1) 阿刀田伸史,伊藤順司,信学技報,SSD85-103,5(1985).
 - 2) H. Winick, "Synchrotron Radiation Research," (Plenum Press, 1980)P.11.
 - 3)伊藤他, 電子技術総合研究所彙報, 43, 613(1985).
 - 4) 鳳絃一郎, 応用物理, 53,17 (1984).
- 2.3節
 - 1) G. Rokowsky and L.R. Hughey, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26, 3845(1979).

2) C. Bernardini et. al, Phys. Rev. Lett. 10, 407(1963).

- 2.4節
 - 1)渡辺誠他, フィジクス 5, NO. 11(1984).
 - 2) G. A. Voss and T. Weiland, DESY 82-074(1982).
 - 3) P.B. Wilson, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28, 2742(1981).
 - 4) A. M. Sessler, Proc, Int. Conf. on High Energy Accelerators, Fermilab, 445(1983).
 - 5) T. Tomimasu, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28, 3523(1981).
 - 6) T. Tomimasu, Proc. 2nd China-Japan Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications (IMP, Academia Sinica, Lanzhou,

1983) p. 135.

- 2.5節
 - 1) H. Takada, S. Miyamoto, T. Mitsui and T. Tomimasu, J. Phys. E, Sci. Instrum. 21, 371(1988).
 - H. Zyngier, Proc. Int. Symp. on Electron and Positron Storage Ring, Sacley (1966) VII b-4-1.
 - 3) S. Ihara et.al., Sumitomo Electric Tech. Rev. 23, 175(1984).
 - 4) A. Feldman et. al., Appl. Phys. Lett. 16, 201(1970).
- 2.6節
 - 1) A. A. Kolomensky and A. N. Levedev, Theory of Cyclic Accelerators, North - Holland (1966) P. 222.

2) H. Takada and K. Furukawa, Denshi Tokyo (IEEE Tokyo Section) 26, 67(1987). 2. 7節

- 1) M. Sands, The Physics of Electron Storage Rings, SLAC 121, reprint (1970).
- 2) K. W. Robinson, Cambridge Electron Accelerator Report, CEA 28(1958).
- 3) H. Takada, Y. Tsutsui and T. Tomimasu, Proc. 6th Symposium on Accelerator Science and Technology (INS, Tokyo, 1987) p. 135.
- 4) J. C. Slator, Microwave Electronics (D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1950) p. 232.
- 5) E. L. Ginzton, Microwave Measurement (McGRAW HILL BOOK COMPANY, INC., New York, 1957) P. 391.
- 6) L. C. Maier, Jr. and J.C. Slator, J. Appl. Phys. 23, 68(1952).
- 7) P. B. Wilson, Proc. 9th Int. Conf. on High Energy Accelerator (1974), KEK - Accelerator - 79 - 7(1980).
- 8) J. P. Blewett, Phys. Rev. 88, 1197(1952).
- 2.8節
 - 1) 遠藤真広, SOR RING Report 3, 46(1973).
 - 2) 鎌田 進, KEK 79- 20, 1(1979).
 - 3) 小林正典, KEK Report 87 8(1987) p. 102.

4) T. Miyahara et. al., INS - TH - 107(1976).

5)北村英男,フィジクス 4 (1984) p.769.

2.9節

1) S. Sugiyama et. al., Proc. 4th Symp. on Acc. Sci. and Tech. (1982) p. 343.

2) 渡辺誠他, UVSOR ストレージリングの設計, UVSOR - 9, 70(1982).

3) T. Yamazaki et. al., Proc. 5th Symp. Acc. Sci. and Tech., 172(1984).

4) Radiation Resistant Fluorescent Screens, CERN TECHNOLOGY NOTE.

第3章 低エネルギー蓄積ビームの診断法

3.1 はじめに

電子蓄積リングへの効率のよい入射・蓄積およびビーム特性の研究のためには蓄積ビー ムの診断が不可欠である。

蓄積ビーム計測は2つに大別して考えることができる。

1) 蓄積ビームの発生する電場、磁場あるいはSR光から得られる間接的情報^{い2)}

2) 蓄積ビームと計測装置を構成する物質の相互作用による直接的情報³⁾⁻⁵⁾

とりわけ、SR光の強度とスペクトルは蓄積ビームの性質に関するすべての情報を含ん で放射されていると言っても過言ではない。特に、測定対象とする低電子エネルギー領域 では可視光が重要である。

本章では、本論文の第4章で述べられる低エネルギー入射蓄積実験に用いた蓄積ビーム 計測の種々の方法と典型的なデータをまとめておく。次節 3.2でビームの造る電磁場を用 いてビーム位置を計測をする際に用いた4極ボタン型モニターの特性ならびに磁気変調型 トランスを蓄積電流計測に適用する場合の幾つかの改良について述べる。3.3 節ではSR 光を用いたビームプロファイル、バンチ長、ベータトロン振動数および蓄積電流の各モニ ターを中心に述べる。蓄積電流計測では、周囲に偏向電磁石等の比較的強い磁場源のある 環境下において、高量子効率のシリコンフォトダイオードを採用した測定法が有用である ことを示す。

3.2 電磁場を用いる蓄積ビーム計測

3.2.1 ビーム位置モニター

電子蓄積リング内の蓄積ビームは設計閉軌道上を周回しなければならないが、偏向電磁 石、収束電磁石の製作誤差および設置誤差により、設計軌道からずれる。(Closed Orbit Distortion, COD)ずれたビーム軌道を修正するために、精度の高いビーム位置モニター (Beam Position Monitor, BPM)が必要となる。ビーム位置測定に対する最も重要な要 求条件として、真空ドーナツチェンバー中の蓄積ビームに悪影響を与えることなく、測定 系のダイナミックレンジを悪くしない構造とすべきであることが挙げられる。真空上問題 のある構造であったり、蓄積ビームとの相互作用が生じやすい構造である場合には、蓄積 ビームに急激な減衰を生じさせる。それゆえ、電極の大きさを小さくし、静電容量を低く してダイナミックレンジを広くとり、かつ真空チェンバーに電極を埋め込める4極ボタン 型モニター^{1) 2)}を採用した。

(i) 4極ボタン型モニター(BPM)の設計

蓄積ビームの自然バンチ長σ_ℓは 2.4 c mであるので、BPMの検出感度を上げるため に、ボタン型電極の直径をバンチ長と同じ 2.4 c mとした。BPMの構造を図3.2-1 に示 す。各ボタン型電極は、フランジに溶接されたBNCタイプの電流導入端子に取り付けら れている。



BPMのビームダクトの断面は、長方形であるので蓄積ビームによって電極上に誘起される電場は二次元ポアソン方程式

 $\nabla^2 \phi = -D_\lambda \delta(X - X_0) \delta(Y - Y_0) / \varepsilon_0 \qquad (3.2-1)$

の解として求めることができる(図3.2-2)。ここで、 ϕ は(X,Y)における電位、 ε 。は 誘電率、(X₀, Y₀)はビーム位置、D₄はビームの線電荷密度である。



図3. 2-2
 蓄積ビームによって電極上に
 誘起される電場の計算座標系

(3.2-1)式の解3)4)は、

$$\phi = D_{\lambda} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sinh a_m (b - Y_0) \sinh a_m (Y + b)}{\varepsilon_0 a a_m \sinh 2ba_m}$$

× sin m
$$\pi$$
 (X₀+a) /2a · sin m π (X+a) /2a (Y ≤ Y₀) (3.2-2)

$$\phi = D_{\lambda} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sinh a_m (b + Y_0) \sinh a_m (b - Y)}{\varepsilon_0 a a_m \sinh 2ba_m}$$

$$\times \sin m\pi$$
 (X₀+a) /2a • sin m π (X+a) /2a (Y > Y₀) (3.2-3)

ここで $a_m = m\pi/2$ a である。各電極中心の電場の Y成分は、

$$E_{1} = E_{Y}$$
 (c, b) = $-\frac{\partial \phi(c, b)}{\partial Y}$

 $= D_{\lambda} \Sigma \frac{\sinh a_{m} (Y_{0}+b)}{\varepsilon_{0} a \sinh 2ba_{m}} \sin \frac{m\pi (X_{0}+a)}{2 a} \sin \frac{m\pi (c+a)}{2 a} \qquad (3.2-4)$

$$E_{2} = E_{Y} (-c, b) = - \frac{\partial \phi (-c, b)}{\partial Y}$$

sinh $a_{\pi} (Y_{0}+b) = m\pi (X_{0}+a) = m\pi (-c+a)$

$$= D_{\lambda} \Sigma \frac{\sinh a_{m} (Y_{0}+b)}{\varepsilon_{0} \text{ a sinh } 2ba_{m}} \sin \frac{m\pi (X_{0}+a)}{2 a} \sin \frac{m\pi (-c+a)}{2 a} \qquad (3.2-5)$$

$$\mathbf{E}_{3} = \mathbf{E}_{Y} (-\mathbf{c}, -\mathbf{b}) = - \frac{\partial \phi (-\mathbf{c}, -\mathbf{b})}{\partial Y}$$

$$= -D_{\lambda} \Sigma \frac{\sinh a_{m} (b-Y_{0})}{\varepsilon_{0} a \sinh 2ba_{m}} \sin \frac{m\pi (X_{0}+a)}{2 a} \sin \frac{m\pi (-c+a)}{2 a} \qquad (3.2-6)$$

$$E_{4} = E_{Y} (c, -b) = - \frac{\partial \phi (c, -b)}{\partial Y}$$

$$= -D_{\lambda} \Sigma \frac{\sinh a_{m} (b-Y_{0})}{\varepsilon_{0} a \sinh 2ba_{m}} \sin \frac{m\pi (X_{0}+a)}{2 a} \sin \frac{m\pi (c+a)}{2 a} \qquad (3.2-7)$$

で表せる。

各電極の出力電圧Vi(i=1....4)は、誘起電場のV 成分に比例するので、蓄積ビームの設 計軌道からの変位 ($\triangle X$, $\triangle Y$) は、

$$S_{X} \triangle X = \frac{V_{1} - V_{2} - V_{3} + V_{4}}{V_{1} + V_{2} + V_{3} + V_{4}}$$
(3.2-8)

$$S_{Y} \bigtriangleup Y = \frac{V_{1} + V_{2} - V_{3} - V_{4}}{V_{1} + V_{2} + V_{3} + V_{4}}$$
(3.2-9)

で与えられる。またSxおよびSyは、それぞれ次式で与えられる。

$$S_{x}^{-1} = \frac{\sqrt{2 \pi}}{a} \frac{1/\cosh(b\pi/a) - 3/\cosh(3b\pi/a) + 5/\cosh(5b\pi/a) - \cdots}{1/\cosh(b\pi/a) - 1/\cosh(3b\pi/2a) - 1/\cosh(5b\pi/2a) + \cdots}$$
(3.2-10)
$$S_{y}^{-1} = \frac{\sqrt{2 \pi a}}{b^{2}} \frac{\sinh((a\pi/2b)/\cosh(a\pi/b) - 2\sinh(2a\pi/2b)/\cosh(2a\pi/b) + \cdots}{1/\cosh(b\pi/2a) - 1/\cosh(3b\pi/2a) - 1/\cosh(5b\pi/2a) + \cdots}$$

 $1/\cosh(b\pi/2a) - 1/\cosh(3b\pi/2a) - 1/\cosh(5b\pi/2a) +$ (3, 2-11)

BPMの寸法諸元は、a = 55mm, b = 19mm, c = 27.5mmであるのでS_x = 8.1%/mm, S_Y =1.7 %/mm となる。 検出感度 1 dB に相当するビーム位置の変位は、水平方向 1.4 mm, 垂直方向7 mmである。

(ii) 感度校正

小型電子蓄積リングに同じ原理、構造のBPMを適用するために、プロトタイプBPM を試作した。ベンチテストの構成を図3.2-3 に示す。リングのrf周波数に相当する158.4 MHz をシンセサイザー(HP 8656 B)を用いて発生させ、ビームを模擬したプローブアンテ ナ(外径 2mm φ中空アルミ製)に印加し、BPMの検出感度を測定した。各ボタン型電 極からの出力信号は、rf同軸スイッチを通し二重シールド高周波同軸ケーブルによりスペ クトラムアナライザー(ADVANTEST, TR 4172) に導かれる。得られた出力電圧の1例を図3. 2-4 に示す。



REF 588.1 HU 158,4987 HH ATT 18 dE RBW 3 kHz UBW 3 kHz

図3. 2-3 ベンチテストシステム構成

図3.2-4 プローブアンテナを用い て得たボタン電極からの出力電圧の例

位置の測定精度を上げるため、アンテナはメカニカルスタンドにクランプするとともに、 BPMを機械的に位置調整可能な台の上に取り付け、それらを水平盤上に置いた。

各スタンドの位置読み取り誤差は0.05mmである。測定した水平方向および垂直方向の 感度曲線を図3.2-5 に示す。

測定した水平方向感度は、Sx (0,0)=8.0 %/mm, Sx $(0,\pm10)=8.7 \%/mm$ であり、計算により求めたSx =8.1 %/mmとほぼ一致する。しかし垂直方向感度はSy (0,0)=2.3%/mm, Sy $(\pm10,0)=4.0\%/mm$ であり、計算値Sy =1.7 %/mm とかなり異なる。 この理由として、 各電極のサイズが有限であるにもかかわらず、 計



図3.2-5 感度曲線の測定結果 (a)水平方向 (b)垂直方向

算においては無限大と仮定したことによる。このサイズ仮定上の問題があるものの水平方 向感度の測定値と計算値がほぼ一致しているのは、ボタン型電極の配列構成がその感度を 決めているためである。測定精度は0.1dB より良好であったので、感度誤差によるビーム 位置分解能は水平方向で0.14mm、垂直方向で0.31mm程度は期待できる。

実使用にあたっては、すべてのBPMについて感度校正を行い、得られた校正カーブを もとに測定したビーム位置を補正することが必要である。尚、リング内を超高真空に立上 げる際にはベーギングを行うため、ヒートサイクルによりリングに組み込むBPMの感度 が変化しないことを確かめておくことが重要である。BPM全体を保温し、~ 200℃、~ 10hのベーキング前後の室温における感度比較を行った結果、感度変化は認められなかっ た。

3.2.2 蓄積電流モニター(磁気変調型トランス:DC-CT)

リング内を周回している電子はバンチしているため厳密には直流ではない。しかし、バンチ間の時間間隔はNIJI-Iの場合 6.3 n s であるのに比して、検出器の応答が極め て遅いので直流とみなしうる。トランスは原理的に直流成分を検出することはできないが、 外部より変調して見かけ上交流にすれば検出が可能になる。⁵⁾

(i) 測定原理

ビームが無い場合の励磁コイルの発生する磁場を

$$H = H_m \cos \omega_r t \tag{3.2-12}$$

とするとHが零から立上がってHsに達した時コアーは飽和し、Bが変化しなくなる。 飽和する時間tsは、

$$t_{s} = \frac{\cos^{-1}\left(\frac{H_{s}}{H_{m}}\right)}{\omega_{s}}$$
(3.2-13)

で表される。一方、更に励磁電流を供給し続けると、 $t=t_r/2-t_s$ で再び非飽和領域になり Bの変化が表れる。検出コイルに発生する電圧はこの Bの変化に比例するから、出力信号 の正負側各々を V_+ , V_- とすると、非飽和領域では

$$V_{+} - V_{-} = -NA \frac{dB}{dt} = NA \mu_{0} \mu H_{m} \omega_{r} \sin(\omega_{r}t) \qquad (3.2-14)$$

ここでN,Aは検出コイルの巻数と断面積である。V+をフーリエ分解すると、

$$V_{+}(t) = -2 N A \mu_{0} \mu f_{r} H_{m} \sum_{n=0}^{\infty} a_{n} \cos(n\omega_{r}t)$$
(3.2-15)

$$\mathbb{C}\mathbb{C}\mathbb{C}a_{n} = \frac{1}{1+n}\cos\left\{(1+n)\cos^{-1}\left(\frac{H_{s}}{H_{m}}\right)\right\} + \frac{1}{1-n}\cos\left\{(1-n)\cos^{-1}\left(\frac{H_{s}}{H_{m}}\right)\right\}$$
(3.2-16)

 V_- のフーリエ分解は、 V_+ のそれを時間で $t_r/2$ ずらしたものであるから、結局出力信号は、

$$V_{0}(t) = V_{+}(t) - V_{-}(t - \frac{t_{-}}{2}) = 4 \operatorname{NA} \mu_{0} \mu f_{-} H_{m} \sum_{n=0}^{\infty} a_{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(n\omega_{+} t - \frac{n\pi}{2}\right)$$
(3.2-17)

 $sin(n\pi/2)$ は n が偶数の時 0 、奇数の時 1 であるから、出力信号は奇数次高調波しか含まないことがわかる。

一方、図 3.2-6(a)に示すようにビーム電流が通過すると、コアー中に H_bの直流磁場が 加わり、それによってB の飽和する時間は、

$$\cos\left\{\omega_{r} (t+\Delta t)\right\} = \frac{H_{s} - H_{b}}{H_{m}}$$
(3.2-18)

と Δt だけずれる (図 3.2-6(b))。ここでHb<<Hm, Hs 従って Δt <<ts とすると

$$\Delta t = \frac{\left(\frac{H_{b}}{H_{m}}\right)}{\omega_{r}\sqrt{1-\left(\frac{H_{b}}{H_{m}}\right)^{2}}}$$
(3. 2-19)

この飽和時間のずれにより出力電圧のスペクトルが変わる(図 3.2-6(c))。 $\triangle t$ が充分小さければ、出力波形は、Bの立上がり部の信号を Δt 左へ、立下がり部の信号を Δt 右へずらしたものと見なせるから

$$V_{0}(t) = V_{+}(t + \Delta t) - V_{-}(t - \Delta t)$$

= 4 N A μ_{0} μ f , H_m $\sum_{n=0}^{\infty}$ a , $\left\{ \sin \left(\frac{n\pi}{2} \right) - n\omega_{n} \Delta t \cos \left(\frac{n\pi}{2} \right) \right\} \sin \left(n\omega_{n} t - \frac{n\pi}{2} \right)$
(3.2-20)

となる。



故に、 { } 内第2項が示すように、ビームが通過した時ビーム電流の直流成分(H_b) に比例した偶数次高調波が新たに発生することがわかる。

コアーの周波数特性を考慮して、通常第2次高調波を検出する。その出力信号の大きさ は、次式で求められる。

この電流トランスはコアーを飽和させる事が本質的であり、励磁電力のかなり大きいも のを必要とする。従って励磁用電力増幅器の設計、および実際のコアーがヒステリシスを 持つ事により発生する励磁電力の損失、コアーの温度上昇、更にコアーの周波数特性を考 慮すると励磁周波数 f, は1 kHz程度以下に選ばざるを得ない。この事はモニターとして の周波数特性が直流から f,/2程度となる事を示している。従って、ビーム電流の大きさ は精度良く観測されるが、その時間的変動に対する応答は鈍くなっている。

実際の出力信号には(3.2-20)式が示すように大きな基本波と奇数次高調波成分が混じっ ており、第2次高調波検出時のS/N を悪くする。これを避ける為に図3.2-7 に記したよう にコアーを2個使用し同成分を打ち消す使い方をする。更に励磁信号を逓倍して 2f,を 得、出力信号を同期検波することによりS/N を上げることも必要である。また検波出力を



コアーに負帰還すれば更に測定精度を上げることが出来る。

この種のDC-CTはUnser^{6) 7)} によって開発されCERN-ISR等で実用化されている。ここでは低エネルギー入射蓄積実験の使用に適する高精度、高安定度で広い電流測定範囲を持ち、しかも周波数特性の改善されたDC-CTを試作した。

(ii) DC-CTの構成

試作したDC-CTの回路図を図 3.2-8に示す。この回路において 0SCの出力 (f = 1 kHz)をパワーアンプで増幅し、コアー1.2 に各々50T巻いて差動接続されている励磁コ イルを励磁すると、コアー1,2 を重ねて50丁巻いてある検出コイルにはビーム電流に比例 した2f電圧が出力される。その2f電圧を2f B.P.Fに入力し、2f成分電圧のみを取り出し、 更にバンドパスアクティブフィルターに入力することにより、2f成分電圧のみを増幅し後 段のAFアンプで必要な電圧まで増幅する。また、基準となる基準電圧はOSC 1 kHzエミッ タから取り出す。その波形は半サイクルごとの正電圧であるので(全波整流波形)2f同調 アンプに入力して正弦波にする。位相回路を通して次のバンドパスアクティブフィルター に入力して基準2f成分電圧のみを取りだし増幅し、後段のAFアンプで必要な電圧まで増幅 される。各々必要な電圧まで増幅された2fDET電圧と2f基準電圧は同期整流器に入力さ れ、基準電圧に同期した2fDET直流電圧(ビーム電流に比例した電圧)が出力される。 その電圧はdcアンプに入力され増幅し、コアー 1、2、3を重ねて25Tずつ2巻線して あるNFコイルにビーム電流のATの 1/50の電流が流れる。即ち、任意のビーム電流に よってコアー1、2の平衡がくずれ、生じた電圧(誤差電圧)によりNFコイルにビーム 電流に比例した直流電流が流れ、NF電流計によってビーム電流を直読することができる。 またコアー3に周波数特性を改善するために交流帰還用AFコイル 500Tずつを2巻線し ている。それからビーム電流に比例した出力電圧を得るために、2巻線している各々のN

Fコイルに直列に電流検出抵抗(金属被膜抵抗)を入れ検出し、インスツルメンテーショ ンアンプを通しFLATAMP出力(5V/0.5A, 5V/50mA)として取り出す。ローパスアク ティブフィルターならびにバッファーアンプを通して出力するようにしてある。コアー1、 2、3を重ねて10T巻いてあるCALコイルはビーム電流校正用巻線である。

図3.2-9 に示すように、DC-CTの検出部はコアー、セラミックダクト、電磁シール ド、ベーキング時のコアー保護用冷却板、壁電流バイパスおよび信号導入端子で構成され る。各コアーの寸法は外径 220mm Ø、内径 190mm Ø、幅10mm(板厚25µmのケイ素 鋼板積層)である。真空ダクトに誘起される電流はセラミックダクトを用いることにより 除去し、アルミ箔で壁電流バイパスを設けた。電磁シールドは地磁気および偏向電磁石等 の漏洩磁場によるノイズ低減のために 5 mm厚の鉄板を用いた。



図3.2-8 試作DC-CTの回路図



図3.2-9 DC-CT用ビームダクト の断面図 (iii) DC-CTの特性

DC-CTの特性として、入出力特性、温度特性ならびに周波数特性を測定した。

アンプ出力のダイナミックレンジは ± 5 Vで、起磁力 ± 50 mATおよび ± 0.5 AT のフルレンジにわたって良好な対称性と直線性を有していることを確認した。図3.2-10に 0~+ 0.5 ATの範囲の入出力特性を示す。



図3.2-10 DC-CTの入出力特性

温度特性を測定するためビーム電流校正巻線より入力信号を入れず、ヒーターでコアー 表面をほぼ均一に加熱することによって10℃~30℃の温度変化を与え、温度が十分飽和し たと見なせる時点での温度係数を求めた。0.5AT レンジで10μAT/℃であり良好な温度安 定性を示した。

周波数特性はコアーのB-H曲線に依存する。パワーアンプのインピーダンスが立上が り時間の間、十分に小さいとすればコアーは十分に飽和する。この時にはコアーの自己イ ンダクタンスは減少し、励磁電流のピーク値は回路抵抗によってのみ制限されることにな る。パワーアンプはこの目的に合うように設計し、検波出力をコアーに負帰還することに よりコアーがヒステリシスを持つために生じる高次偶数高調波および励磁電力損失を制限 できる。測定した周波数特性を図3.2-11に示す。直流から10 kHzの範囲にわたり周波数特 性が改善されていることを示しており、蓄積ビームの突発的な電流変化にも追随できるこ とがわかった。

DC-CTをリングの長直線部S。に設置したとき、偏向電磁石の漏洩磁場による影響

-88-

を避けるため、磁気シールドを施しているにもかかわらず零点の変動が認められた。蓄積 ビーム電流が零の場合の偏向磁場強度とDC-CTのオフセットの関係を図3.2-12に示す。 入射エネルギーを変えて実験を行う際には、この曲線よりオフセットを決めて蓄積電流を 算出している。しかし超電導電磁石を用いる小型電子蓄積リングにおいては、磁場強度、 漏洩磁場がさらに大きくなることが予想されるため、磁気シールド構造等に工夫が必要と なる。



3.3 SR光を用いる蓄積ビーム計測

電子蓄積リングから放射されるSR光を用いて蓄積ビームに関する多数の情報を得ることができる。なかでも、ビームサイズならびに蓄積電流を測定するのに非常に有用である。

この節では、TVカメラ、フォトダイオードアレイを用いたビームプロファイル測定お よび高速フォトダイオードを用いてバンチ長を測定する方法、更にはフォトメトリックな 方法で光束を測ることによって蓄積ビーム電流を求める方法等について述べる。 3.3.1 光学パラメータ

接線方向に沿って放射されるSR光の角度の拡がり ') は

$$\phi = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\lambda}{\lambda_{c}} \right)^{1 \times 3} \qquad \lambda \gg \lambda_{c} \qquad (3.3-1)$$

で表される。軌道面間で観測すると図3.3-1 に示すように軌道円弧上の各点からのSR光 を見ることになる。



図3.3-1 水平軌道面内のSR光

円弧長S と発光点の見かけの拡がり△X は

$$S = \rho \theta \qquad (3.3-2)$$

 $\Delta \mathbf{X} = \rho \,\theta^2 \,/ \mathbf{8} = \,\mathbf{S}^2 \,/ \,2\,\rho \tag{3.3-3}$

となる。 θ を小さくすれば視界深度からくる ΔX は小さくできるが、一方回折によるぼけ は大きくなる。回折限界は

$$\delta X = \lambda / \sin \theta \sim \lambda / \theta \tag{3.3-4}$$

従って、(3.3-3) と(3.3-4) 式より観測角度θを

$$\theta = 2 \quad \left(\frac{\lambda}{\rho}\right)^{-1/3} \tag{3.3-5}$$

とするのがよい。

実際には θ は発光点から ℓ の距離にあるアパーチャーサイズ $a = \ell \theta$ から決められる。 垂直方向に関しては、 (3.3-1)式で与えられるSR光の角度拡がりに合わせるのがよい。 3.3.2 ビームプロファイルモニター

(i) TVカメラによるビームスポット観測

リングからのSR光をf =50mmのレンズとTVカメラを用いて観測する。カメラが飽 和しないようNDフイルターを用いる。図3.3-2 にビームプロファイルの例を示す。



図3.3-2 観測したビームプロファイ ルの例、(a)ビームスポット (b)水平方向 (c)垂直方向 (1mm/div)

(a)は観測したビームスポットであり、(b)、(c)は観測したビーム画像をコンピータで画像処 理した水平方向および垂直方向のビームプロファイルである。TVカメラによるビームプ ロファイルの観測は極めて高感度であるが、光量と出力の直線性は必ずしもビームサイズ の詳細な議論をする上からは十分なものではないと考えられる。

TV画像は常にコントロールルームでモニターしている。これは、入射エネルギーを変 化させる場合、トランスポート系とリングの電磁石および入射用パルス電磁石の電流値を 調整するときのビーム輝度の変化による入射効率の良否、また蓄積ビームに生ずる各種不 安定性により生じるビームスポット形状の変化を直観的に観測できるため大変有用である。

(ii) フォトダイオードアレイによるビームプロファイルモニター

NIJI-Iの自然ビームサイズは、電子エネルギーE = 160MeVにおいて $\sigma_x = 0.24$ mm、 $\sigma_z = 0.1$ mmである。電子エネルギーE = 50-160MeVで放射されるSR光は、 λ 。 =5527-169 Åの可視あるいはUV領域の光である。光源からは0.5 mの所に5 mm ϕ の アパーチャーを設ければ、SR光の垂直方向最大拡がり角は±5 mradとなる。一方、 偏向部の真空槽に取り付けてあるビューイングポートの窓材はUV光を透過しないため、 4000 Åの波長の可視光に対してE = 160MeVのSR光の角度拡がりは±4.6 mradとな り、アパーチャーサイズから決まる観測角度とほぼ一致する。

アレイ上でのビーム像の分解能を向上させ、光学系の拡大率の調整を容易にするために も十分な長さのアレイが必要である。そこで、1 素子の大きさが幅 0.9mm、高さ4.4mm で放射感度は 7000 Åで 470 mA/W, 立上がり時間 1 μ s であるフォトダイオードを 35素子並べたアレイ (Hamamatsu S2311)を用いた。その外観および特性を図3.3-3 、表 3.3-1 に示しておく。



図3.3-3 シリコンフォトダイオード アレイの外観

表3.3-1 シリコンフォトダイオードアレイの特性

受光面(1素子当り)			分光感度		特 性 (25 ℃ 1素子当り)				
	右州			ピーカ	放射感度typ.(mA/W)		暗電流	接合容量	
サイズ	百稜	素子数	波長範囲	は「「	ピーク			1 d	Ci
	LELI 1)M				とノ	200 nm	930nm	max	typ
(mm)	(mm²)		(nm)	(nm)				(pA)	(pF)
4.4×0.9	3.96	35	190~1000	700	470	80	210	50	550
									$(V_R=0V)$
								$(V_R = I 0 V)$	140
									$(V_R = IOV)$

シリコンフォトダイオードアレイは、受光面に入射したSR光の強度ならびに積分周期 に比例した電荷を発生し、各チャンネルの接合容量に積分された電荷量はマルチプレクサ で順次増幅器を通してオシロスコープで読み取ることができる。

ビームプロファイル観測のために偏向電磁石 B₈のビューイングポートに設置した光学系 を図3.3-4 に示す。設置スペースの制約より、ビューイングポートからのSR光をミラー で反射させ、焦点距離 f ~25 c m, 5 c mの 2 枚の凸レンズ (開口D = 5 c m) を組み合 わせて用い、アレイ前に置いたハーフミラーにより水平方向および垂直方向のそれぞれの ビームプロファイルを測定する。レンズ球面誤差は(D/f)³ に比例する。²⁾ この場合2.14 ×10⁻⁷ r a d, 2.68 ×10⁻⁵ r a dと求められ、ビームサイズに及ぼす影響は無視できる。

色収差を低減するために4000± 300Åのバンドパスフィルターを用いている。光学系の 倍率は 5.6倍となる。 図3.3-5 にビームプロファイルの測定例を示す。



次にアパーチャーの回折による誤差を評価する。回折誤差は

$$\sigma_{d} = \frac{1}{2.35} (1.22 \frac{\lambda \ell}{a}) \tag{3.3-6}$$

で定義される。³⁾ ここで、 λ はSR光の波長、 ℓ は光源とアパーチャー間の距離、a はア パーチャーの口径である。 λ = 4000 Å, ℓ =0.5m, a = 5mmを用いると σ_{d} = 21 μ m となる。それゆえ、E =160MeVにおける垂直方向自然ビームサイズ σ_{z} = 0.1 mmに対し て $\sigma_{z} = \sqrt{100^{2} - 21^{2}} \times 10^{-3} = 0.098 \text{ mm}$

と見積られ、十分に高い精度を有していることがわかる。

3.3.3 バンチ長モニター

低エネルギー電子のTouschek 寿命ならびに縦方向バンチ結合不安定性を診断するため に、バンチ長およびバンチ形状を測定することが重要となる。バンチ時構造は図3.3-6 に 示す高速PINシリコンフォトダイオード(SPD)とサンプリングオシロスコープの組 合せを用いて測定できる。⁴⁾⁵⁾低電流領域においても、十分な感度が得られるように焦点 距離f=5cmのレンズを用いてSPDの受光面(0.1 mm×0.07mm)上に集光する。こ こで用いた高速SPD(Antel ARS-2)の特性を表3.3-2 に示す。



SPDならびにサンプリングオシロスコープの立上がり時間はそれぞれ t_o=35ps, t_o= 60psであるので測定系としての立上がり時間は

 $t_{s} = (t_{p}^{2} + t_{0}^{2})^{1/2}$ (3.3-8)

で求められ、約70psとなる。それゆえ、この測定系は~140psの時間分解能を持つ。

電子とSR光の行路差による誤差の評価は文献6に詳しく述べられているが、NIJI - Iの場合0.32psであり、測定系の時間分解能に比して十分小さく無視できる。163MeV, 70 mAで観測したバンチ波形の一例を図3.3-7 に示しておく。

(3, 3-7)

表3. 3-2 高速SPD (ARS-2)の特性

Parameter	Symbol	Units	Value
photosensitive area		mm²	. 01
spectral response	(λ)	nm	300-1100
risetime (typical)	(t _P)	ps	35
responsivity	(R)	A/W	>0.20 @720nm
noise equivalent power	(NEP)	W/(Hz) ^{1/2}	1×10 ⁻¹⁰
damage * threshold		mW	100
output impedance		ohm	50 + /-2 %
bias voltage		V	18 + /-3 %

* maximum average power dissipation ability of the photodiode



図3.3-7 バンチの時構造

E=163MeV, I=70mA

3.3.4 ベータトロン振動数モニター

ベータトロン振動数は、共鳴にかかることによる振幅の増大またはビームの損失を防ぐ ため、設計動作点の近くに保たれなければならないが、これを測定するにはRF knockout(RF-KO)法と呼ばれる方法が用いられる。これは軌道上の一点に設置した電極に 高周波電圧を印加して蓄積ビームに強制振動を与え、周波数ω,でリング内を周回してい るベータトロン振動と共振させる方法である。RF-KOによるビームの運動方程式は、 t = nT (n = 0, 1, 2 ……)よりnを連続とみなすと

$$\ddot{X} + (2 \pi \nu)^2 X = f \sin(n \omega T)$$
 (3.3-9)

ここで、X はビームの変位、 ν は ν = m ± Δ ν (m:正整数)で表されるベータトロン振動数、右辺は強制振動項である。(3.3-9) 式の解は

$$X = \frac{f}{(2 \pi \nu)^2 - (\omega T)} \sin(n \omega T)$$
(3.3-10)

$$\omega = 2 \pi \nu / T = (m \pm \Delta \nu) \omega_{\tau}$$
(3.3-11)

に一致した時、共振が起こりベータトロン振動の振幅が増大する。この方法では、 ν の整 数部分mをきめることはできないが、設計の精度はmを決めるのに十分である。ベータト ロン振動数の小数部分は、 $\Delta \nu$, $1 - \Delta \nu$ で共振するが収束電磁石の収束力を変化させた 場合のベータトロン振動数の変化を調べることにより $\Delta \nu$, $1 - \Delta \nu$ のいずれかを求め、 それから決定することができる。蓄積ビームに振動を与えた時に、低エネルギーで明らか にしなければならないトラップイオンの定量化に影響を及ぼさないようなモニター設計を すべきである。すなわち、モニターは振動振幅をできるだけ小さくし、高感度の検出系と することが重要となる。

(i) RF-KO電極

RF-KO電極は図3.3-8 に示す4本のロッド電極から構成される。水平方向あるいは 垂直方向のベータトロン振動数を測定する際には、2対ずつの電極をそれぞれ並列に接続 する。2対のロッド電極の特性インピーダンスは高周波源ならびに伝送線との整合(50Ω) をとるため、個々のロッドのインピーダンスを 100Ωとする。

図に示す一様な断面を有し、長手方向Z に長い一対(一円筒が他の円筒内にある)の円 筒導体のインピーダンスを求めるには、 Zを複素数とし、その解析関数をWとして

$$Z = A \operatorname{cot} \left(\begin{array}{c} W \\ 2 j \end{array} \right)$$
(3.3-12)

で表される変換を用いる。上式を共役関数で書き換えると

$$-96-$$



図3.3-8 RF-KO電極構造

$$Z=X + jY = \frac{A (\sin V + j \sinh U)}{\cosh U - \cos V}$$
(3.3-13)

$$X = \frac{A \sin V}{\cosh U - \cos V}, \qquad Y = \frac{A \sinh U}{\cosh U - \cos V}$$
(3.3-14)

となる。これらより

$$X^{2} + (Y - A \cosh U)^{2} = A^{2} \cosh^{2} U$$
 (3.3-15)

 $(X - A \cot V)^{2} + Y^{2} = A^{2} \csc^{2} V$ (3.3-16)

を得る。ゆえに、U = -定はY軸上に中心を持つ円であって等電位線を表し、またV = -定は X軸上に中心を持ち、かつ常に 2 点($0, \pm A$)を通る円であって電気力線を表す。

二つの等電位線を円筒導体面で置き換え、円筒の半径を r_1 , r_2 とし、その中心距離をa、 円筒導体電位を V_1 , V_2 とすると

$$r_{1} = A \operatorname{cosech} V_{1}$$

$$r_{2} = A \operatorname{cosech} V_{2}$$

$$a = A (\operatorname{coth} V_{1} - \operatorname{coth} V_{2})$$

$$(3.3-17)$$

となるから導体間の電位差は

$$V_1 - V_2 = \cosh^{-1} \frac{r_1^2 + r_2^2 - a^2}{2 r_1 r_2}$$
 (3.3-18)

となる。一方、電荷Qは導体単位長当り-2πε。であるから、静電容量Cは

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi \varepsilon_{0}}{\cosh^{-1} \left(\frac{r_{1}^{2} + r_{2}^{2} - a^{2}}{2r_{1} + r_{2}} \right)}$$
(3-3-19)

となる。特性インピーダンスZ。はZ。 = $\sqrt{\varepsilon_0 \ \mu_0}$ /c より

$$Z_{0} = \frac{\sqrt{\mu_{0}}}{2 \pi \sqrt{\varepsilon_{0}}} \cosh^{-1} \left(\frac{r_{1}^{2} + r_{2}^{2} - a^{2}}{2 r_{1} r_{2}} \right)$$
(3.3-20)

で与えられる。

NIJI-IではZ₀=100 Ω を得るため、 r_1 = 2 mm, r_2 =67.1 mm, a=61.2mmを 採用した。

(ii) ベータトロン振動数の検出系

蓄積ビームの速い振動の測定には、高感度でS/N 比の高いスペクトラムアナライザーと トラッキングジェネレータの組合せが有効である。ブロックダイヤグラムを図3.3-9 に示 す。トラッキングジェネレータの出力をパルスジェネレータで変調し、広帯域パワーアン プで増幅してRF-KO電極に印加する。励振された蓄積ビームの運動は、ピンホールの 位置をビーム断面の端において光電子増倍管により検出され、その出力はスペクトラムア ナライザーに表示される。



NIJI-Iではエネルギー分散関数が零ではないので、シンクロトロン振動のサイド バンドが現れる。このサイドバンドの位置は、rf空胴に供給するパワーを変化させるとず れるので、変化しない共鳴周波数よりベータトロン振動数を求めることができる。図3.3-10にスペクトラムアナライザーで観測した水平方法のf_{βx}, 垂直方向のf_{βz}の例を示す。


図3.3-10 ベータトロン振動数の測定例、 マーカーf_{βx}=8.2820MHz, f_{βz}=9.8165MHz

ここで蓄積ビームのリング周回周波数は22.63 MH_z であるのでベータトロン振動数 ν_x = 1.366, ν_z = 1.566 が得られる。

3.3.5 フォトメトリック蓄積電流モニター

(i) モニター構成

高量子効率のシリコンフォトダイオード(SPD)を用いると、リング内を周回してい る電子数が少ない時には、電子がrfバケットから確率的に逸脱したり、ガス分子との衝突 により一個単位で失われてゆく現象がSR光強度のステップ状減衰として検出できる。^{5)・7)} このステップ数に対応するSPD出力電流の変化を測定すれば、電子一個に相当する光電 流がわかる。この方法を適用して蓄積電流を測定することは、偏向電磁石等の強い磁場の ある環境下で有用な測定技術となり得る。

SR光を用いる蓄積電流モニターの構成を図3.3-11に示す。通常は電子数の計測用(校 正用)と直線性を利用した相対強度(光電流 – 蓄積電流)計測用に2種類のSPDを用い た。電子数の計測では、ビューイングポートを通過した微弱なSR光のSN比を高め検出 感度を上げるために焦点距離50mmのレンズを用い、受光面積の可及的小さいSPD上に 結像させるとともに、できるだけ発光点に近づけた。一方、運転時は~10¹⁰個の電子が蓄 積されるため、蓄積電流の増加およびビーム不安定性に起因するビームサイズ(発光点) の増大等により、SPDの受光面から発光点の像がはずれることが懸念される。このため、 それぞれの要請に合うように、受光面積の異なる2種類の検出器を用いることにした。



図3.3-11
 SR光を用いる蓄積電流
 モニター(電子数の計測
 用)相対強度計測用はレンズを除きR₁の切り換
 えができるものである。

(ii) 測定系の雑音特性

リング内を電子がほぼ光速で周回することによる蓄積電流は

 $I = N e f_{\tau} = N e \cdot c / 2 \pi R \qquad (3.3-21)$

と表せる。ここでNはリング内の電子数、f,は周回周波数、 $2\pi R$ はリング周長である。 $2\pi R = 13.256$ mであるから、電子一個に相当する電流はI = 3.62 p Aとなる。

一方、一個の電子が単位波長、面内単位角あたりに放射するSR光のパワーは(2.2-2) 式で与えられる。 $\lambda = 4000$ Åでは、 $\sim 1.6 \times 10^{-18}$ W/Åmrad-electron である。従って 電子数を計測するために重要である測定系の雑音特性の低減対策について述べておく。S PDと電流・電圧(I-V)変換器より構成される測定系の等価回路を図3.3-12に示す。



 $\boxtimes 3$. 3 – 1 2

シリコンフォトタ(オード(SPD)と電流
 電圧(1-V)変換器の等価
 回路, R_D. C_D: SPDの
 並列抵抗、接合容量, i_D:
 R_Dによる熱雑音電流, A₀:
 :無雑音増幅器, R_A, C_A,
 e_A, i_A: 増幅器の入力
 抵抗、入力容量、入力雑音
 電圧、入力雑音電流, R₁,
 C₁: R² の熱雑音電流

出力に生じる全雑音電圧 er は次式で与えられる。

$$e_{T} = z_{f} \sqrt{\left(\frac{e_{A}}{z_{s}}\right)^{2} + i_{A}^{2} + i_{D}^{2} + i_{f}^{2}}$$
(3.3-22)

ここで

$$|\mathbf{z}_{f}| = \mathbf{R}_{f} / \sqrt{1 + \omega^{2} \mathbf{C}_{f}^{2} \mathbf{R}_{f}^{2}}$$
 (3.3-23)

$$|z_{s}| = R_{D} / \sqrt{1 + \omega^{2} C_{D}^{2} R_{D}^{2}}$$
(3.3-24)

$$\mathbf{i}_{\mathrm{D}} = \sqrt{4 \, \mathbf{k} \, \mathbf{T} \, \mathbf{B} / \mathbf{R}_{\mathrm{D}}} \tag{3.3-25}$$

$$\mathbf{i}_{f} = \sqrt{4 \, \mathbf{k} \, \mathbf{T} \, \mathbf{B} / \mathbf{R}_{f}} \tag{3.3-26}$$

ωは信号の角周波数、k はボルツマン定数、Tは絶対温度、B は周波数帯域幅である。

最も問題となるのは、SPDが持つ熱雑音(Johnson noise) i D である。これを抑える には(3.3-25)式で明らかなように、並列抵抗 RD の大きな、周波数帯域Bの狭いSPDも 用いて温度を下げればよい。また RD を大きくする場合は入力雑音電圧 e A より入力雑音 電流 i A が支配的となるため、 i A の小さい増幅器の選定が重要である。なお、 e A の寄 与は小さいとはいえ、 (3.3-22)、(3.3-24)式よりSPDの容量 CD は小さい方が望まし い。つまり、一般に受光面積の小さいSPDを選ぶ方が雑音が小さいことになる。この他、 蓄積電流が大きくなるにつれ光電流のショットノイズが増してくる。光電流 i の時のショ ットノイズ i S は、電子の電荷を e とすると

$$i_{s} = \sqrt{2 e i B}$$
 (3.3-27)

で表せる。蓄積電子一個の減衰によるSPDの電流 i 」は蓄積電流に依らず一定であるが、 i 。は光電流すなわち蓄積電流の平方根に比例して増加するため、校正に用いることがで きる電子数を制限することになる。この場合のSN比(SNR)を考えてみると、

$$SNR = \frac{i_{1}}{i_{s}} = \left(\frac{e \int \eta (\lambda) \phi (\lambda) d\lambda}{2 e NB}\right)^{1/2}$$
(3.3-28)

となる。ここで $\eta(\lambda)$ は受光面の量子効率、 $\phi(\lambda)$ は電子一個から放射される単位時間、 単位波長当りの光子数、Nは蓄積電子数である。(3.3-28)式より、SNRの向上を図るに は、量子効率が大きく、周波数帯域Bが狭いほど良い。さらに、信号そのものに対する感 度を上げるためSR光の取込み立体角を大きくとり、SR光とSPDとの間の分光特性を 合わせ有感波長域を広くすることも重要な要素となる。

(ⅲ)電子数計測

電子数の計測のために、焦点距離50mmのレンズにより水平、垂直ともに30mradの 範囲のSR光をSPD上(浜松ホトニクス製 S1227-33BQ,受光面 2.5×2.4 mm)に結像 させた。I-V変換器に用いる増幅器には、特に入力雑音電流の少ないものを用いる必要 があるため、バラクターブリッジ型でバイアス電流が 10fAのBURR-BROWN製の3430Jを採 用した。なお帰還抵抗R_fを大きくすれば感度は上がるが、SPDの内部抵抗R_Dや増幅 器の入力抵抗R_Aと同程度以上となると誤差が増加するため、ここではR_f=10¹¹Ωとし、 これと並列に容量10pFのコンデンサC_fを入れた。従って、R_fC_fで決まる時定数は1 秒であり、周波数帯域は電子一個のステップ状の減衰を検出するのに支障にならない程十 分に狭い。以上、(ii)で述べた測定系の雑音の低減を考慮した電子数計測装置を用い rf 加速空胴に供給している rf 電力を減少させ、十分に小さい蓄積電流とした後、さらに rf 電力を調整して、電子の減衰の速度を加減しながら測定を行った。電子数の計測例を 図3.3-13に示す。

NIJI-Iの場合、電子一個に相当する電流は3.62 pAであるのに対し、SPDに励 起される電流は0.02 pAであった。

電子数が千個程度となると、ショットノイズが増してくるのが観測されるが、数百個以下では雑音レベルはほぼ一定であり、SPDの持つ熱雑音に起因するものであると考えられる。



図3.3-13 蓄積電子数の段階状減衰を 示すSPD出力

(iv)相対強度計測

実用的な蓄積電流レベルの計測のために、レンズによる集光を行わず、比較的受光面積 の大きいSPD (浜松ホトニクス製、S1226-8BK 受光面 5.8×5.8 mm)に直接SR光を 入射し、SPDの直線性を利用⁸⁰ してこの光電流より蓄積電流の相対値を知ることができ る。このモニターは電子数の計測用とは別のビューイングポートに取り付けられており、水 平垂直両方向とも±4mradのアパーチャーを有する。I-V変換器の増幅器は電子数 計測用に用いたものと同一であり、帰還抵抗R₆ は蓄積電流に応じ切り換えて使用してい る。SR光の入射光束は電子数計測用の3/500 であるため、大電流領域においても非線形 性は生じていない。

このシステムでは、電子数計測用と相対強度計測用に機能を分離しているため両者の校 正が必要である。計測できる電子数が多い程、校正の際の精度は向上するが、電子数数百 個レベルでショットノイズの増加が観測される。しかし電子数計測の誤りはないと見られ るので、このレベルで校正をおこなった。蓄積電流モニターとしての精度は、相対強度計 測用のSPDの受光面積が大きいことに起因するゆらぎ誤差が蓄積電流1mAから200mA において±1%であったので、抵抗比の決定の際の誤差±0.2%を考慮して、総合誤差は 約±1.2%と推定される。

3.4 むすび

電子蓄積リングを構成するサブシステムがそれぞれの性能を満たしたとしても、トータ ルシステムとしての動作を確認し、更に蓄積電流の向上を目指すためには蓄積ビームの診 断を正確に行なわなければならない。

本章では、従来から良く知られているモニターを含めて診断法を低エネルギービームに 適用した場合の精度評価の他に、その感度向上の方法等について検討した。これらは次の 第4章、第5章の低エネルギー入射蓄積実験ならびに大面積露光実験での蓄積ビーム計測 に適用される。

次に電子蓄積リングの小型化を図る上からは、おのずから用いるモニターの種類、数を 選択する必要がある。SR光を用いるモニターは、同一目的の蓄積ビームの造る電磁場を 利用するモニターに比較してリング直線部を短縮し易く、周囲からくる電気的ノイズから 直接邪魔されにくい利点があることに着目し、この診断法が極めて有用であることを明ら かにした。

以下に研究結果を列記する。

- ビーム位置モニターに関しては、ビーム位置を水平方向 0.14mm、 垂直方向 0.31 mmの相対位置精度で測定できることを示した。
- 2) 蓄積電流モニターについては、磁気変調型トランス(DC-CT) ならびにフォトメトリックな計測法を検討し、これらの診断法において注意すべき事柄について述べた。DC-CTでは入出力特性,温度特性および周波数特性は満足すべき結果を得たが、偏向電磁石の漏洩磁場による零点の変動が生じ、磁気シールドの改善が更に必要であることを示した。フォトメトリックな計測法では漏洩磁場の影響を受けず、約±1.2 %の精度で蓄積電流計測が可能であることを実証した。
- ビームプロファイルモニター、ベータトロン振動数モニターについては、実際の蓄積 ビームへの応用を検討した。

4) バンチ長モニターとして有効なストリークカメラは時間分解能も高いが高価である。
 そこで、高速PINシリコンフォトダイオードとサンプリングオシロスコープを組み
 合わせて用いることにより140 psの時間分解能が得られ、その有効性を確認した。

以上の諸検討により、実用的な小型電子蓄積リングが具備すべきモニターとして、リン グ内に組み込むビーム位置モニター、RF-KO電極以外はすべてSR光を用いたビーム モニターとしうることがわかった。この成果は、リングの直線部にモニターのために確保 すべきスペースが少ないことを明確にしたことであって、リングの小型化ひいては経済性 向上のために寄与するものである。

参考文献

3.1節

1) J. Borner and R. Jung, CERN /LEP-BI/84-14 (1984).

2) A. Hofmann, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28, 3 (1981).

- 3) L. Bernard et. al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-30, 4(1983).
- 4) K. Potter and S. Turner, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-22, 3(1975).

5) D. A. G. Neet, CERN/ISR-CO/68-47 (1968).

3.2節

- 1) Tejima et. al., Proc. 4th Symp. Acc. Sci. and Tech. RIKEN, 153(1982).
- 2) T. leiri et. al., Proc. 5th Symp. Acc. Sci. and Tech. KEK 154(1984).
- 3) J. Cuperus, CERN / PS/LIN 76-7 (1976).
- 4) J. D. Jackson, "Classical electrodynamics" (John Wiley & Sons, Inc.) (1975).
- 5) W. Geyger, "Magnetic Amplifier Circuits" (Mc Graw-Hill Book Company) (1957).
- 6) K. Unser, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-16, 3(1969).
- 7) K. Unser, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28, 3(1981).

3.3節

- 1) A. Hoffman, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28, 3(1981) p. 2132.
- 2) Optics Guide, Melles Griot, Irvine, CA92714, p.24.
- 3) R. J. Nawrocky et. al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-32, 5(1985) p. 1894.
- 4) A. P. Sabersky, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-18, 3(1971) p. 939.
- 5) T. Noguchi et. al., Proc. 4th Symp. Acc. Sci. and Tech. 129(1982).
- 6) I. H. Munro and A. P. Sabersky, in H. Winick and S. Doniach, ed.
 - "Synchrotron Radiation Research" Plenum, N.Y (1980) p. 328.
- 7) T. Saito et. al., Bul. Electrotech. Lab. 49, 431(1985).
- 8) H. J. Jung, Metrologia 15, 173(1979).

第4章 低エネルギー入射蓄積

4.1 はじめに

低エネルギー入射により小型電子蓄積リングに大電流蓄積が可能となればリングシステ ム全体が小型化され、また経済性に優れたシステムとなる。それ故、必要とされる蓄積電 流を得ることのできる入射エネルギーレベルを明確にすることがますます重要となってき た。

さて、フルエネルギー入射を行っている中型および大型の電子蓄積リングについては、 これまでに蓄積電流を制限する現象(特に、ビーム不安定性)に関して詳しく系統的に調 べられ、¹⁾それらに対し適当な対策がとられてきている。しかしながら、イオントラッピ ング²⁾による問題は多くの電子蓄積リングに現れているにもかかわらず、その詳細は未 だ十分に解明されているわけではない。低エネルギー入射において生じるビーム不安定性 を明らかにし、対策を講じておくことは実用機である超電導小型電子蓄積リングを設計す る上からも極めて重要な指針を与えるものとなる。

更に、低エネルギー入射で大電流蓄積を成し遂げる上での問題点は

i)低エネルギーにおいてはTouschek寿命³⁾が短い。

ii)入射の頻度を決めるベータトロン振動の減衰時間が長く、高繰り返し入射が困難となり多量の電子をためこむことができない。⁴⁾

であると言われている。これらの問題点が実際に蓄積電流をどの程度制約することになる のかを理論ならびに実験によって定量化しようとするのが本章の目的である。

4.2 N | J | - | の動作実験

NIJI-Iが図4.2-1 に示すように一応の完成をみたのは1985年12月末で、リングを 構成する各サブシステムがトータルシステムとして健全に動作することを確認するために 入射実験を開始した。1986年 2月28日に最初のビーム蓄積に成功した。¹⁾ここでは、動作 実験結果ならびに蓄積電流の向上に有効であった事柄について述べる。

NIJI-Iへの電子入射には、電子エネルギー163 MeV、パルス幅0.5 μ s、ピーク 電流~100 mAのビームを用いた。まず、偏向電磁石(B_D:B_I-B₈)、横収束4極 電磁石(Q_F)および縦収束電磁石(Q_D)の励磁電流をおおよその設計電流値に設定す る。入射用セプタム電磁石の電流設定には、設計入射ビーム軌道の延長線上セプタム出口



図4.2-1 小型電子蓄積リング NIJI-I

より約2mに設置したカウンタメータの線量とB」のビューイングポートに設置してある TVカメラにより、入射電子の放射するSR光の強度が最大となるようにその励磁電流を 調整する。次にキッカー電磁石を励磁し、 r f 加速系を運転しつつ、キッカー電磁石の励 磁電流およびタイミング調節を行う。図 4.2-2、図 4.2-3 に蓄積成功時に観測したSR 光のフォトマル波形ならびに蓄積電流向上の推移を示す。動作試験の初期の段階では、い ずれの電磁石の励磁電流を変化させても蓄積電流は、0.03mA以下で増加せず、キッカー 電磁石を設計上とは逆の時間関係にあるタイミングで励磁した場合の方が、蓄積効率がむ しろ高いという結果が得られた。この原因調査のため、入射ビームのタイミング検出系 (プラスチックシンチレーターのシンチレーションをフォトマルで電流信号として増幅し、 制御室へ伝送)およびキッカー電磁石の極性のチェックを行った結果、問題のないことが わかった。再度 B_D, Q_F, Q_Dの励磁電流のチェックを行い、Q_Fの励磁電流表示回路 のハンダ付不良により実際の電流を表示していないことがわかった。すなわち、リングの 動作点が大幅にずれていたことが原因であった。改良後、0.5 mAの蓄積電流が得られた が目標値 200mAにはほど遠い。この時点では入射効率も良くはなく、検討の結果セプタ ムおよびキッカー電磁石の位置の微調が蓄積効率に影響していることを見い出した。そこ で、ビームトランスポート系に2台のステアリングコイルを追加し、リング入射点におけ るビームの位置と方向の微調を可能にするとともにセプタム真空槽ならびにキッカー真空



図4.2-2 フォトマルによって観測し た電子が放射するSR光、 リング1周44nsに7バ ンチの周回している様子が わかる。



図4.2-3蓄積電流向上の推移

槽の位置の調整を行った。その結果、蓄積効率は急上昇し、蓄積電流50mAを得ることが できた。図4.2-4 はNIJI-IからのSR光である。このリングはQ_F, Q_Dの収束力 を変えることにより、動作点を可変とすることができる。最も入射蓄積効率の良い動作点 のサーベイを行い、水平、 垂直方向のベータトロン振動数が (ν_x , ν_z) = (1.37、 1.53)であることがわかった。この時のベータトロン関数 β_x , β_z ならびにエネルギー分 散関数 η を図4.2-5 に示す。更に蓄積電流の向上を図るために、リング長直線部 (S₃, S₅, S₇)に設置してあるBPMを用いて蓄積ビームの位置を測定した。長直線部のベ ータトロン関数 β_x は他の箇所に比して大きいので、閉軌道のずれ (C.0.D)が生じやすい。 測定結果から蓄積ビームは中心軌道よりS₃ 部で 0.8mm 外側、S₅ 部で 2.0 mm



(a)

(b)

図4. 2-4 NIJI-IからのSR光 (E=163 MeV、I~20mA) (a)は正面、(b)は側面より撮影した写真



X 4. 2-5ベータトロン関数とエネル ギー分散関数

内側、S₇ 部で0.8 mm 内側にずれているのがわかった。このようにC.O.D が生じてい ると蓄積効率が悪くなる。なぜならば、入射ビームは中心軌道に対して最大±40mmのベ ータトロン振幅を持つので、入射時の閉軌道にずれを生じることになりビームのすそのが 真空ダクトをかすったり、偏向電磁石のn値の一様な領域をはずれたりすることになる。 このリングにはステアリングコイルを設置していないので、C.O.D を補正するには各偏向 電磁石に巻いた補正コイルを励磁することによって磁場を発生させて、新たにC.O.D を発 生させ、今まであったC.O.D を打ち消すようにする。そのために、まず個々の偏向電磁石 毎の補正コイルを一定電流で励磁し、その時のS₃,S₅,Sィにおける蓄積ビームの変位を

測定し、C.O.D が最小となるように励磁すべき電流および補正コイルの組合せを選ぶ。結 果として偏向電磁石B₁, B₄の励磁電流を補正コイルにより0.15%増加させた。こうす ることにより蓄積電流は120 mAに到達した。しかし、蓄積電流の増加につれて顕著な垂 直方向のビームサイズの増大およびベータトロン振動数のシフトが認められた。これは蓄 積ビームと残留ガス分子が衝突して生成されたイオンがビーム内にトラップされ、ビーム 不安定性を引き起こすイオントラッピング現象ではないかと考えられた。リング内にはイ オンクリアリングのための単独の機能を持つ電極は設置していないので、図4.2-6 に示す ようにBPMをクリアリング電極として用いて直流電圧-400 Vを印加し、イオンクリア リングを試みた。図4.2 -7は実験結果で、垂直方向のビームサイズは縮小され、蓄積電流 は200 mA以上へと増加を示した。イオントラッピングは蓄積電流を制限する要因の一つ であることを意味する。



図4.2-6 イオンクリアリング電極



図4.2-7 TVカメラで観測したビームプロファイル(E=163 MeV、I=90mA)
 (a) dc イオンクリアリング電圧を印加しない場合 (b) dc イオンクリアリング電圧-400 Vを印加した場合

蓄積電流が 200mAを越えてからビームの突発的なロスがしばしば起こるようになった。 現象論的にはビームローディングによる不安定性であることを示唆している。蓄積ビーム は電磁誘導により r f 加速空胴を励振する作用を持っている。加速作用を及ぼされるとき の蓄積ビームの位相安定性はRobinson²⁾ によって与えられ

$$S = \frac{\partial V_s}{\partial t} = -\omega_{rf} \left[V_c \quad \sin\phi + \frac{I R_{sh}}{2 (1+\beta)} \sin 2\phi \right] > 0 \quad (4.2-1)$$

を満たす条件の下で失われる。(第2章2.7節参照)図4.2-8に示すように蓄積電流 Iと 同調角 ∉に依存した不安定領域が存在する。



図4.2-8 蓄積ビームの位相安定性

Iに対して図中の破線で示した安定領域に移行するようにφを調整すればよいことになる。 換言すれば、大電流を蓄積するときには共振周波数より高い周波数で動作させる必要があ る。そこで~100 kHzのディチューニングを行った結果、突発的なビームロスは抑制され、 安定して 300mA以上の蓄積電流を得ることができた。³⁾

図4.2-9 に1986年6月から1987年3月までのイオンクリアリングを行わなかった場合の 蓄積ビームの1/e寿命の変化を示す。rf加速電圧は20kVである。蓄積電流が増加す るに従って寿命が延びているのは、SR光による真空の枯れが進んだことによる。1987年 3月の最大の蓄積電流344 mAにおける寿命は約50分であった。更に低エネルギーの寿命 を評価するために、動作点を一定に保ったままB_D、Q_F、Q_Dの励磁電流を変えること のできるインターロッキングコントローラーを用いて、励磁電流を減少させることにより 電子エネルギーを減少させた。51.6MeVおよび80MeVにおける寿命を図にあわせて示して



図4.2-9 蓄積電流の1/e寿命 (1986年6月-1987年3月)

ある。これより、低エネルギーで蓄積ビーム寿命を短くすると予想したイオントラッピン グ効果は、低電流領域においてあまり寿命に影響を及ぼしていないと考えられる。

また動作試験として確認を要するのは、入射エネルギーから最大蓄積エネルギーまで加 速を行った場合の加速安定性である。加速による磁場変化は真空ダクトならびに軟鉄製ポ ールピースに渦電流を生じさせ、磁場の一様性を乱す原因となる。そのため、ここではイ ンターロッキングコントローラーを用い、163 Me V で蓄積した100 m A のビームを230 Me Vまで7.2 s で加速した。この時の磁場変化は0.046 T/s であり、十分速い上昇速度であ るがビームロスは発生しなかった。このことから実用機の電子エネルギー上昇幅は 700Me V程度以内であるので、約 1.3min で加速できることが明らかになった。

最近のNIJI−Iの動作試験では、163 MeVで475 mA、90 MeVで425 mAの蓄積 電流を達成している。

4.3 イオントラッピング現象の解明

電子蓄積リングではビーム通路は超高真空に保たれているが、ビームと残留ガス分子が 衝突して生成されたイオンがビーム内にトラップされ、ビームに種々の影響を及ぼすこと が近年徐々に明らかになってきた。¹⁾⁻³⁾その顕著な例として、100 MeV入射リングであ るウイスコンシン大学の Aladdinに見られるように、ビーム寿命が極端に短くなり蓄積電 流が制限された。⁴⁾⁵⁾ NIJI-Iでは電子エネルギー100 MeV以下の低電流領域で、イ オンは蓄積ビームに重大な影響を与えないことを検証したが、大電流蓄積を成し遂げるた めにはイオンの効果を定量的に把握し、イオン除去のための方策を講じることが必要とな ると考えられる。 4.3.1 イオントラッピング過程

(i) 中性ガスのイオン化

NIJI-Iの真空ドーナツチェンバー中は、現在ビームの無い状態で 2×10^{-10} Torr の真空度であるが、マススペクトル分析より、種々のガス分子が存在していることがわか っている。その主成分はH₂ とCOである。リング中の蓄積ビームはこれらの分子をある 確率でイオン化する。1個の電子が1個のイオンを生成するのに要する時間を ionization time と呼び

$$\tau_{\rho} = \frac{1}{d_{m} \sigma_{m} \beta c}$$
(4.3-1)

で与えられる。ここでd_m、 σ_m は分子mの密度(m⁻³)、イオン化断面積(m²)であ り、 β cは電子の速度である。 σ_m は分子の種類と電子の速度にのみ依存し、F.F Rieke and W. Prepejchal⁶⁾によって次式で与えられている。

$$\sigma_{m} = 4 \pi \left(\frac{\hbar}{mc} \right)^{2} \cdot \left(M^{2} X_{1} + C X_{2} \right)$$

$$(4.3-2)$$

$$X_{1} = \beta^{-2} \ell_{\pi} \{ \beta^{2} / (1 - \beta^{2}) \} - 1$$
(4.3-3)

$$X_{2} = \beta^{-2}$$
 (4.3-4)

ここで

$$4 \pi \left(\frac{\overline{h}}{mc} \right)^{2} = 1.874 \times 10^{-24} (m^{2})$$
 (4.3-5)

$$\beta = v / c \tag{4.3-6}$$

である。 M^2 およびCは分子を特徴づける定数であり、表4.3-1 に主要ガス分子について 分子数Aおよび分子の電子数Zもあわせて示しておく。図4.3-1 に(4.3-2) – (4.3-6) 式 を用いて計算した H_2 とCOに対するイオン化断面積を示す。20℃における分圧 P_m から 分子密度 d_m への換算は次式で与えられる。

$$d_{m} = 3.3 \times 10^{22} P_{m}$$
 (4.3-7)

表4. 3-1 イオン化断面積の計算に用いられるM² Cの値

Molecule	M²	С	Z	А
$\begin{array}{c} H_{2} \\ N_{2} \\ CO \\ O_{2} \\ H_{2} \\ O \\ CO_{2} \\ C_{6} \\ H_{4} \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.5\\ 3.7\\ 3.7\\ 4.2\\ 3.2\\ 5.75\\ 17.5 \end{array}$	$\begin{array}{c} 8.1\\ 34.8\\ 35.1\\ 38.8\\ 32.3\\ 55.9\\ 162.4\end{array}$	$2 \\ 14 \\ 14 \\ 16 \\ 10 \\ 22 \\ 46$	$2 \\ 28 \\ 28 \\ 32 \\ 18 \\ 44 \\ 76$



図4.3-1
 電子エネルギーに対するイオン化断面積の関係

NIJI-Iの場合、電子エネルギーE=160 MeV (γ = 313) 蓄積電流~100 mAのと きのリング内真空度はP~1×10⁻⁹ Torr で、COおよびH₂の分圧はそれぞれ0.4 × 10⁻⁹ Torr, 0.6 × 10⁻⁹ Torr であるので、(4.3-1) 式と(4.3-7) 式より ionization timeは τ_{co} ~1.9 s, τ_{H2} ~6.9 s となる。すなわち、イオン化断面積の大きいCOが早 く生成され、イオンの蓄積ビームに及ぼす影響を議論する上で最も重要な分子であること がわかる。

(ii) 蓄積ビームへのイオントラッピング

ビーム通路に生成されたイオンは、外部から電磁場の作用がなければ蓄積ビームの造る 電場の影響を受けて運動する。この電場が造るポテンシャルは、ビームサイズと真空ダク トの寸法諸元ならびに真空ダクトがアースポテンシャルであることから求められる。ここ では、蓄積ビームが周回軌道上に一様に分布しており、ビームと真空ダクトはそれぞれ半 径 a, r 。の同軸円筒形であると仮定した場合、電場はビーム中心方向へ向き

$$E_{r} = - \frac{e \lambda}{2 \pi \varepsilon_{0}} \frac{r}{a^{2}} r \leq a \qquad (4.3-8)$$

$$E_{r} = - \frac{e \lambda}{2 \pi \varepsilon_{0}} \frac{1}{r} \qquad r \ge a \qquad (4.3-9)$$

で与えられる。ここでλは単位長さあたりの電子数である。ビーム中心からrの距離での ポテンシャルは

$$V = -\int_{r_0}^r E_r dr$$

$$= \begin{cases} \frac{e \lambda}{2 \pi \varepsilon_{0}} \left(\frac{r^{2}}{2 a^{2}} - \frac{1}{2} + \ell_{n} \frac{a}{r_{0}} \right) & r \leq a \quad (4.3-10) \\ \\ \frac{e \lambda}{2 \pi \varepsilon_{0}} \ell_{n} \frac{r}{r_{0}} & r \geq a \quad (4.3-11) \end{cases}$$

となる。図4.3-2 に蓄積電流 200mA, $r_0 = 50$ mmの真空ダクトに対してビームサイズ aをパラメータとしたポテンシャルの計算結果を示しておく。ポテンシャルはa/r。が 小さい程深くなることがわかる。すなわちaが小さい程またr。が大きい程、ポテンシャ ルは深く、生成イオンは深いポテンシャルの方向へドリフトしトラップされる。イオン生 成過程でイオンがビームから得る運動エネルギーは、ほぼ熱エネルギー程度(~4×10⁻² eV)であるのでほとんどのイオンはトラップされることになる。

電子蓄積リングにおいては蓄積ビームはバンチングして周回している。バンチしたビ



図4.3-2 蓄積ビームの造る静電ポテ ンシャル ームが残留ガスと衝突し、生成される多種類のイオンのうち蓄積ビームの造る電場内にト ラップされるイオンの質量Aについて考える。

イオンはバンチの通過する間だけ引力を感じ、バンチとバンチの間では自由ドリフトす る。thin lens 近似によるバンチ通過に伴う収束力は、バンチ当りの電流値に比例し、電 荷密度を与えるビームサイズに依存する。任意の初期条件を持つイオンの運動が安定すな わちビーム中にトラップされる条件はA>>Acである。Acは次式で与えられる臨界質量 である。

 $A_{c} = \frac{1}{2} \left(\frac{2 \pi R}{h} \right)^{2} \frac{r_{P}}{e c \beta^{2}} \frac{I}{\sigma_{z} (\sigma_{x} + \sigma_{z})}$ (4.3-12)

ここで、各記号は

2 π R:リング周長 h:ハーモニック数 βc:蓄積ビーム速度 σ_x, σ_z:ビームサイズ

 \mathbf{r}_{P} : 古典陽子半径(= e² / 4 $\pi \varepsilon_{0}$ m_P c²)

を表す。

NIJI-Iではバンチ数h=7であり、160 MeVにおいて蓄積電流 3~190 mAの範囲 で実測したビームサイズを用いて臨界質量を計算すると、A。<< 1 となり、どんな質量の イオンでもトラップされることがわかる。(4.3-12)式より明らかなようにA。はh⁻²に比 例するので、バンチ数を低減することによりイオントラッピングをある程度抑制できるこ とがわかる。

次にイオンが蓄積ビーム内にトラップされ、イオンの蓄積が進む場合の限界について考 える。電子軌道上へのイオンの蓄積は、イオンの空間電荷による発散力がイオンの運動を 不安定にするまで続くことになる。イオントラッピングが抑制される限界のイオン密度 d は、イオンがドリフトする長さを発散力を与える厚肉レンズと考えると、

$$\mathbf{d}_{i} = \boldsymbol{\beta} \cdot \frac{1}{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{d}_{e} \qquad (4.3-13)$$

で与えられる。⁷⁾ ここで、 $\beta = v_c / c$ 、d。はバンチ内の電子密度、Bはバンチファク ターと呼ばれ

$$B = \frac{\pi R}{h\sigma_{\ell}}$$
(4.3-14)

で定義される。 ここで σ_{ℓ} はバンチ長である。 蓄積ビームの中和の程度を表す量である neutralization factor η は、 $\beta \sim 1$ であるから

$$\eta = \frac{\mathbf{d}_{i}}{\mathbf{d}_{e}} = \frac{\beta}{\mathbf{B}} = \frac{\mathbf{h}\sigma_{\ell}}{\pi \mathbf{R}}$$
(4.3-15)

となる。また、neutralization factor を $\delta = N_i/N_o$ で表せば $\delta = \eta$ Bとなり、イオン数 N_iと蓄積電子数N_oが同数になるまでイオントラッピングが進むことになる。一方イオンク リアリングをしたときのδはイオンの生成率と除去率がバランスする δ_{ON} となり

$$\delta_{\text{ON}} = \frac{\ell}{\nu_{\text{s}} \tau_{\text{P}}} \tag{4.3-16}$$

で与えられる。ここで υ 。はイオンのドリフト速度であり、ℓおよび τ 。はそれぞれクリ アリング電極の設置間隔、イオン化時間である。

(iii) イオンの運動

トラップされるイオンの質量は、臨界質量より十分大きいのでイオンの微小な運動は調 和振動とみなして取り扱うことができる。座標系は図4.3-3のようにとる。

自由空間においては、x, s方向のイオン運動は

$$\ddot{\mathbf{x}} = -\omega^2{}_{\mathbf{x}} \bullet \mathbf{x} \tag{4.3-17}$$

 $\dot{s} = v_{\pm}$



図4.3-3 イオンの運動座標系

(4.3-18)

ここで、ωx はイオンの角振動数、υ、はイオンの熱速度を表す。偏向電磁石の中では、 イオンは一様な磁場Bとビームが造る電場から力を受ける。このときの運動方程式は、

 $\mathbf{\dot{x}} = -\omega_{\mathbf{x}}^{2} \cdot \mathbf{x} + \omega_{\mathbf{c}} \cdot \mathbf{\dot{s}}$ (4.3-19)

$$\dot{s} = -\omega_c \cdot \dot{x}$$

となる。ここでω。はトラップされたイオンのサイクロトロン角振動数である。(4.3-19)と (4.3-20)式よりイオンは次式の速度でドリフトする。

(4.3-20)

 $\dot{\mathbf{s}} = | \boldsymbol{\omega}_{c} \cdot \mathbf{x} (\mathbf{0}) + \dot{\mathbf{s}} (\mathbf{0}) | [\boldsymbol{\omega}^{2}_{x} / (\boldsymbol{\omega}^{2}_{x} + \boldsymbol{\omega}^{2}_{c})]$ (4.3-21)

x(0), $\dot{s}(0)$ は、イオンのxの方向の位置と速度に関する初期条件である。

4.3.2 イオンの蓄積ビームに及ぼす影響

(i) ベータトロン振動数のシフト

蓄積ビーム内にトラップされたイオンは、ビームに対し水平および垂直両方向ともに収束 力を及ぼし、ベータトロン振動数にシフトを生じさせる。シフト量は次式で与えられる。

$$\Delta \nu_{x, z} = \frac{e}{4 \pi \gamma m c^2} \int ds \quad \beta_{x, z} (s) \quad \frac{\partial E_i (s)}{\partial x, z}$$
(4.3-22)

ここで、 $\beta_{x,z}$ (s) はベータトロン関数、 E_{1} (s) はイオンによる電場、 $\gamma m c^{2}$ は電子エ ネルギーを表す。

イオンの長手方向の分布は一様であるとし、イオンの断面内分布は蓄積ビームのそれの2 倍とするモデル⁸⁾を仮定すると ∂E_i (s) $/ \partial x_i$ z は

$$\frac{\partial \mathbf{E}_{1}}{\partial \mathbf{x}_{.} \mathbf{z}} = \frac{\mathbf{d}_{1}}{\varepsilon_{0}} \frac{\mathbf{e}}{1 + (\sigma_{\mathbf{x}_{.} \mathbf{z}} \neq \sigma_{\mathbf{z}_{.} \mathbf{x}})}$$
(4.3-23)

となる。ここで、 d₁ , ε_0 , σ_x , σ_z は、それぞれイオンの密度、真空の誘電率、水平 および垂直方向ビームサイズである。古典電子半径 r 。= e² / 4 $\pi \varepsilon_0$ m c² を用いると、 イオンによるシフト量は

$$(\Delta \nu_{x}, z) = \frac{r_{e}}{\gamma} \int \frac{d_{z}}{1 + (\sigma_{x, z} \neq \sigma_{z, x})} \beta_{x} \cdot z \text{ (s) } ds \quad (4.3-24)$$

となり、イオンによる力は収束であるから $\Delta \nu_x$ 、 $\Delta \nu_z$ とも高い方にずれることになる。 (4.3-24)式で与えられる $\Delta \nu_x$ 、zは、ビームサイズに強く依存していることがわかる。 次に、(4.3-24)式で与えられるシフト量と蓄積ビームの空間電荷効果によるシフト量の大きさを比較する。後者のシフト量は

$$(\Delta \nu_{x}, z)_{e} = \frac{r_{e}}{\gamma} \int \frac{d_{e}}{1 + (\sigma_{x, z} \neq \sigma_{z, x})} \frac{\beta(s)}{\gamma^{2}} ds \qquad (4.3-25)$$

で与えられるので

 $(\Delta \nu_{\rm X}, z)_{\rm i} = \eta \gamma^2 (\Delta \nu_{\rm X}, z)_{\rm e}$ (4.3-26)

となる。電子蓄積リングにおいてはγが大であるので、イオンによるシフト量の方が支配的 である。

ここまで、電子とイオンの密度分布は一様であるとの仮定のもとで議論してきたが、イオンの分布は蓄積ビームと同程度の大きさを持つガウス分布であり、イオンの造る電場は非線形である。このため蓄積ビームはベータトロン振動振幅に応じて異なった収束力を受けるのでベータトロン振動数に拡がり(tune spread)を持つことになる。

(ii) 蓄積ビーム寿命の短縮

イオントラッピングが生じた場合、蓄積ビームはイオンとの衝突によって散乱され、ビー ム寿命の短縮が起こる。イオンは蓄積ビームと同様のサイズ内に分布をしているものとする と、イオンとの衝突によるビーム寿命は中性ガス散乱による寿命と等価である。イオンとの 衝突によるビーム寿命は

$$\frac{1}{\tau_{1}} = \frac{N_{1} \sigma_{T} \beta c}{4 \pi \sigma_{X} \sigma_{Z} L}$$
(4.3-27)

となる。ここでN₁はリング内にトラップされたイオン数、σ_Tはイオンを構成する原子の衝 突断面積、Lはリング周長である。イオントラッピングが進めばビーム寿命が短縮され、大 電流蓄積が困難となる最大の要因となりうると考えられる。

4.3.3 イオンクリアリング

トラップされたイオンを除去するために、 $dc クリアリング^{5} \stackrel{9)}{}^{10}$ 、rfクリアリング²⁾ ^{3) 11)} およびrfバケットへの partial filling ^{12) 13)} 等の方法が試みられ、それらの対 策の有用性が確かめられている。ここではdcおよびrfクリアリングについて述べる。実 験としては最も直接的な方策であり、蓄積ビームとのカップリングの小さいボタン型電極を 用いるdcクリアリングを行った。

(i) dcクリアリング

蓄積ビームの造る電場内にトラップされたイオンは、d c クリアリング電極を用いて外部 からこの電場を打ち消す電場を印加すれば除去することができる。

蓄積ビームの周回軌道上に存在するイオンを十分重いと考えれば、イオンはバンチとバン チの通過の間ではほとんど動かず、多くのバンチの通過を平均して感じるので、イオンの運 動はバンチしていないビーム内での運動で近似できる。すなわち、長手方向の電子の分布は 一様であるとの仮定が成り立つ。また、蓄積ビームの断面内に電子が均一に分布していると 仮定したときの蓄積ビームの造る最大電場は(4.3-23)式より

 $\mathbf{E}_{z}^{\max} = 120(\Omega) \ \mathbf{I}(\mathbf{A}) \neq (\sigma_{x} + \sigma_{z}) \ (\mathbf{c} \mathbf{m}) \ (\mathbf{V} \neq \mathbf{c} \mathbf{m})$ (4.3-28)

で与えられる。

電子エネルギー150 MeVで測定したビームサイズを用いて、上式から見積もった蓄積ビー ムの造る最大電場 E_2^{max} を図4.3-4 に示す。蓄積電流 I = 200 mAで E_2^{max} は83V/cmで ある。一方 B P Mにクリアリング電圧 V dcを印加した場合の蓄積ビーム位置に生じる電場を 有限要素法による計算機シミュレーションで求めた結果、これが約0.04 V dc (V/cm)で



図4.3-4

測定したビームサイズσx

(水平方向)、 σ_z (垂直方 向) σ_ℓ (長手方向)より求 めた蓄積ビームの造る最大電 場 \mathbf{E}_2^{max} あるので $Vdc = -2 k V の クリアリング電圧が必要であることがわかる。しかし、実際の蓄積ビームの断面形状は、ほぼガウス分布形状をしているので、最大電場 <math>E^{vax}_{2}$ は見積もった値の約1/2でよいことが予想される。さらに低エネルギーの電子であればある程、電子の多重散乱効果によりビームサイズが大きくなる傾向にあるため、 E^{vax}_{2} は小さくなり、より低いクリアリング電圧V dcを印加するだけでイオンは除去できると推定される。

(ii) r f クリアリング

蓄積ビーム中にトラップされたイオンが不安定となる振動周波数について考察する。イオンの位置と速度をx, x とすれば、これらはバンチの通過前後で次式に示す変化を受ける。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X}_{2} \\ \mathbf{\dot{X}}_{2} \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{1} \\ \mathbf{\dot{X}}_{1} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{T} \\ -\overline{\omega}^{2} & \mathbf{T} & -\overline{\omega}^{2} & \mathbf{T}^{2} + 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{1} \\ \mathbf{\dot{X}}_{1} \end{pmatrix}$$

$$(4.3-29)$$

$$\overline{\omega} = \frac{I e / \pi \varepsilon_0}{A m_P c \sigma_Z (\sigma_X + \sigma_Z)}$$
(4.3-30)

で与えられる。ここでAはイオンの質量数であり、m^Pはプロトンの質量である。周期Tに おけるイオン振動の位相の進みμは

$$\cos \mu = \frac{1}{2} \operatorname{Tr} M = 1 - \overline{\omega}^{2} \operatorname{T}^{2} / 2 \qquad (4.3-31)$$

により与えられる。イオンの振動周波数fは

$$f = \frac{\mu}{2 \pi T}$$
(4.3-32)

となる。ここで、 $\overline{\omega}^2 T^2$ (〈1の時には、イオンの周波数は $\overline{\omega}/2\pi$ とみなせる。蓄積ビームに(4.3-32)式で与えられる周波数の振動を加えると、ビームはイオンの運動と共鳴してイオンはビーム中からけり出されることになる。E = 150 MeV、I = 200 mAの実測ビームサ

イズ $\sigma_x \sim 1.1 \times 10^{-3}$ (m), $\sigma_z \sim 1.5 \times 10^{-3}$ (m)を用い、A=28のCOイオンに対し、 f ~ 0.4 MHzを得る。

4.3.4 イオンクリアリング実験

(i) イオントラッピングの観測

NIJI-Iにおいて蓄積電流の増加とともに垂直方向のビームサイズの増大する現象が TVカメラを用いたビームプロファイルモニターで観測された。このビームサイズの増大が 他の不安定性によるものでないことを明らかにするために、より直接的に判別しうる現象で ある制動輻射を観測することにした。蓄積ビームと中性ガス分子ならびにトラップされたイ オンとの衝突により放射される制動輻射をサーベイメータ(型式 Aloka ICS-151)を用いて 検出する。入射エネルギーが低いため残留放射線の影響はほとんど無視できる。制動輻射の 観測点はrf空胴を設置してある長直線部S⁷とし、その点から約1m離れたビームレベル にサーベイメータを置いた。中性ガス分子ならびにトラップされたイオンと蓄積ビームとの 相互作用により発生する制動輻射はrf空胴のフランジを通りサーベイメータに入る。その 指示値をテレビカメラを用いて制御室で読み取ることができる。

BPM1~3に同時にVdc -1kVを0N/0FF した時の制動輻射の強度を蓄積電流の減衰 量とともに記録した。電子エネルギーE=155 MeVにおける蓄積電流に対する0N/0FF 時の 制動輻射の強度および蓄積電流の減衰率を図4.3-5 に示す。制動輻射の強度は蓄積ビームの 減衰率に従って変化している。蓄積されている電流量が多ければ、SR光による真空壁から のガス放出が増加するため検出される制動輻射の強度は高くなり、蓄積ビームの減衰率が大 きくビーム寿命を短くしている。リング内の真空度は蓄積電流に応じて変化するが、同じ蓄



図4.3-5
 クリアリング電極に直流電
 圧Vdc=-1kVを印加し
 た場合の制動輻射強度の変
 化。破線は蓄積電流の減衰
 率を示す。

積電流のときには、ON/OFF に従う変化はほとんどない。特に ON/OFF 時の蓄積ビームの減衰率が同じとなる蓄積電流~180 mAに着目すると、ON/OFF 時の制動輻射の強度差は中性ガスからイオン化され、蓄積ビーム内にトラップされたイオンに起因していることを示している。ここで用いた測定法は、イオンの効果を定量的に評価できる程十分なものではないが、蓄積ビーム内のイオントラッピングを直接観測できるものであると言える。

(ii) 実験-dcクリアリングの効果

実験方法

蓄積ビーム内にトラップされるイオンのneutralization factor δは、d c クリアリン グ電圧ならびに電極個数に依存するのは明らかであるが、従来あまり実験が行われていな い低エネルギーにおけるd c クリアリングの効果をベータトロン振動数のシフト量を測定 して調べた。ベータトロン振動数は第3章3.3.4 で述べたRF-KO法を用いて測定した。 実験条件を以下に示す。

電子エネルギー	90, 150, 210Me V
蓄積電流	約10~約 200mA
ベータトロン振動数	$\nu_{\rm x} \sim 1.37$
(at ~10mA)	$\nu_z \sim 1.53$
r f 加速電圧	24k V
d c クリアリング電圧	0~約−1kV (可変)
電極個数	BPM 1個, 2個, 3個 (可変)

② 実験結果と検討

a) d c クリアリング電圧依存性

一例として図4.3-6 に、BPM3個に印加したdcクリアリング電圧Vdcを変えて測定 した電子エネルギー150 MeVのベータトロン振動数のシフト量 $\Delta \nu_x$ の蓄積電流依存性を 示す。Vdc=0kV, I=180 mAで $\Delta \nu_x \sim 0.014$ であった。Vdc=-1.07kV, I= 200 mA のとき $\Delta \nu_x \sim 0.002$ となり、Vdc を高くするに従って $\Delta \nu_x$ は低い値になり トラップされたイオンは除去されていることがわかる。図4.3-7 は、ビューイングポート (B₈) で測定したビームサイズからリング内の平均ビームサイズを求め、 実測 $\Delta \nu_x$ より(4.3-24)式を用いて計算したneutralization factor δ のd c クリアリング電圧Vdc 依存性を示したものである。これらの結果は、次のことを示している。

イ) Vdc=0kVでは、電子エネルギーならびに蓄積電流が大になるとともにδは増大







図4. 3-7ベータトロン振動数のシフ ト量から求めたneutralization factor δ のd c クリ アリング電圧依存性(a)E = 90MeV、(b)E = 150 MeV、 (c)E = 210 MeV する。

- ロ) $V dc = 0 k V では、蓄積ビームの電荷が完全に中和される<math>\delta = 1 \pm c \ell \tau \lambda$ のトラ ップが進むはずであるが、 $\delta t = 1 \pm c \ell \tau \lambda$ のかなり小さい。
- ハ) Vdcを増してゆくにつれδは低下し、電子エネルギーと蓄積電流に依存した一定の δになる傾向を示している。

すなわち、低エネルギーではVdc=0kVの場合、ビーム中にトラップされるイオンは少 なくなることがわかる。しかしながら、大電流領域の電流減衰速度が大きく、ベータトロ ン振動数のシフト量を測定することができなかった。この原因解明については4.4.4 項で 述べる。また低エネルギーになればなる程、低いVdcでイオンが除去されていることが明 らかとなり、上に述べた低エネルギー電子のビームサイズが大きくなることとよく一致す る。

b) d c クリアリング電極個数依存性

Kohaupt の与えた(4.3-16)式によれば、 δ_{on} はd c クリアリング電極間距離 ℓ 、イオン の長手方向へのドリフト速度 v。ならびにイオン生成率($1 / \tau_{p}$)の関係で決まること になる。d c クリアリング効果の電極個数依存性を調べた。なおd c クリアリング電圧と しては δ の電圧依存性が生じない電圧を印加することとし、150 MeVおよび210 MeVの場 合 Vdc=-1 k Vとし、90MeVの場合 Vdc=-0.4 k Vとした。蓄積電流は I =100 m A である。図4.3-8 の●印で示す結果を得た。これらの結果は次のことを示している。

- イ) クリアリング電極を1個設置するだけでも顕著なイオンクリアリング効果を示す。 この効果は電子エネルギーが高い程大きい。
- ロ) 150 MeVおよび210 MeVの場合、電極個数を増やす効果は若干認められるが、90Me Vではほとんどその効果はなくなる。

これはイオンのドリフト速度 v 。が熱速度に比してかなり大きくなるか、あるいは低エ ネルギーになる程イオンの生成率 $1 / \tau$,が低くなり、この効果が δ_{0x} の変化として現れ ないためと考えられる。そのためクリアリング電極の設置間隔 ℓ の影響が認められない。 そこで測定したリング内真空圧力より $1 / \tau$,ならびに(4.3-21)式より v 。を見積り、実 験結果と比較する。イオントラッピングで問題とすべきイオンは、生成速度が大きく、衝 突断面積の大きいCOイオンである。正確な議論をするためには、蓄積ビーム軌道上のC O分圧を知らなければならない。しかし、その部分のCO分圧を測定することは困難であ り、通常は、分圧測定器の取り付けてあるところで測定したCO分圧を用いることが多い。 一般に超高真空領域においては、全圧に占めるCO分圧の比率はほぼ一定と考えられるが、 ここでは真空測定点のうち最も高い圧力を示すrf空胴部での全圧をリング内平均CO分 圧と見なし、取り扱うこととした。一方、COイオンの長手方向へのドリフト速度υ。は、 リングの直線部では熱速度290 m/sであり、偏向電磁石部ではイオンは偏向磁場と蓄積 ビームが造る電場中でサイクロトロン運動をすることにより、電子エネルギー90~210 Me Vに相当する磁場中では、その速度は1500~2000m/sとなる。よってリング全周にわた るCOイオンの長手方向平均ドリフト速度を求めることができる。

以上の手順により計算したδを図4.3-8 に○印で示してある。●印および○印で示した δのクリアリング電極個数依存性はほぼ同様の傾向を示している。

この実験により、150 MeV以下の低エネルギーではリングにd c クリアリング電極1 個 を設置し、16~40V/cmのクリアリング電場を与えるだけで、ほとんどのイオンを除去 できることがわかった。この理由として、低エネルギーになる程SR光による真空ダクト 表面からのガス放出による真空圧力の上昇が低くなり、イオン生成率が減るためであると 結論できる。

更に、Vdc = 0 k V、I = 100 m A O条件で、リング内真空度と δ 関係を図4.3-9 に示す。これより、 δ はリング内真空度にほぼ比例していることがわかる。



図4. 3-8 neutralization factor δ のd c クリアリング電極個数依存性、 〇印は(4.3-16)式からの予想値、●はベータトロン振動数シフト量から求めた 実測値、(a)E=90MeV、(b)E=150 MeV、(c)E=210 MeV



図4.3-9 イオンクリアリング電圧を 印加しない場合のneutralization factor るのリング 内真空度依存性(I=100 mA)

(iii) まとめ

この項の結果をまとめると次のようになる。

- 1)イオントラッピッグの診断にはサーベイメータによる制動輻射の計測が有用である。
- 低エネルギーである程、ビームサイズが増大するために、低いクリアリング電圧で イオンを除去できることを明らかにした。
- 3)イオンは偏向磁場と蓄積ビームが造る電場によりサイクロトロン運動をするために、 その速度は熱速度の5~7倍にもなる。
- 4) Vdc=0 k Vの場合、neutralization factor δ はリング内真空度にほぼ比例する。
- 5) d c クリアリング電極個数依存性に関するモデル計算を行い、実験結果をほぼ説明 できた。

4.4 蓄積ビームの寿命

4.4.1 Touschek 寿命

バンチ中の2個の電子の弾性散乱を考えると、進行方向のモーメンタムるq(r.m. s)が、バンチの静止系において横方向成分より大きい縦方向成分を持つとき、横方向成 分の一部は縦方向成分へ変換される。そして両電子はrfシステムのセパラトリクスから 逸脱し、電子は失われることになる。この損失機構は Touschek 効果としてよく知られ、 低エネルギーで大電流を蓄積するときの電子損失の主要原因になると考えられる。Touschek 効果は、20数年以上も前に ADA リングで初めて見出された¹⁾が、その時観測された 蓄積ビーム寿命は、理論から予想される寿命より約50倍も長かった。 Touschek 寿命を計 算するために種々の理論式が提案されている。²⁾⁻⁵⁾しかし、近似の程度に差はあるもの の非相対論的な電子一電子散乱モデルを用いている。計算を実行するにあたって、次の仮 定を前提とする。

①バンチ中のすべての電子は、同一のエネルギーEを有する。②モーメンタムの垂直方 向成分 δq_x は水平方向成分 δq_x より十分小さい。よって全電子のモーメンタムが同一 軌道内に停留する偏平状ビームを対象としている。しかし、近年より長い Touschek 寿命 を得るために、水平方向および垂直方向のベータトロン振動に強い結合を起こした完全円 状ビームに対する解析が Miyahara によって提案され、SOR-RINGを用いた実験結 果と極めてよく一致することが示された。⁶⁾

しかし、 Touschek 効果が問題となる低エネルギーの大電流領域で設計されたリングは なく、そのため系統的な実験が行われて来なかった。ここでは Bruckによって与えられた 解析法について述べ、NIJI-Iで得られた実験結果について考察する。

実験室系での r f システムのセパラトリクスに関係するモーメンタムアクセプタンスを $\triangle P_{max}$ とする。質量中心系での関係式 $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ を用いて計算すると、弾性散 乱後の長手方向のモーメンタムの成分変化が

$$\gamma \mid q \cos \theta \mid > \triangle P_{\max} \tag{4.4-1}$$

を満たすとき電子の損失が生じる。ここでθは散乱角を表す。質量中心系において、バン チ体積 d V 内の電子数を d N とすれば散乱による電子損失率は

$$dN = -\overline{v\sigma}\rho \, dN \tag{4.4-2}$$

となる。ここでv = 2 q / m d 2 個の電子の相対速度であり、 ρ および σ はそれぞれ電子 密度(dN / dV)、全散乱断面積である。全散乱断面積はクーロン散乱に対するそれぞ れの電子の散乱断面積を積分することにより次式で与えられる。

$$\sigma = \int_{0}^{\cos \frac{1}{\mu}} d\theta \sin \theta \int_{0}^{2\pi} d\phi \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)$$
(4.4-3)

ここで、 $\mu = \triangle P_{max} / \gamma q$ であり、 ϕ は散乱電子の方位角である。 $\overline{v\sigma}$ にはバンチ内の 位置依存性がないものとすれば、全バンチの電子損失率は

$$\mathbf{N} = -\overline{\mathbf{v} \, \sigma} \int \rho^2 \, \mathrm{d} \, \mathrm{V}$$
 (4.4-4)

となる。実験室系において、バンチ中の電子密度は

$$\rho = \frac{N}{(2 \pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_z \sigma_\ell} \exp\left\{-\left(\frac{x^2}{2 \sigma_x^2} + \frac{z^2}{2 \sigma_z^2} + \frac{\ell^2}{2 \sigma_\ell^2}\right)\right\}$$
(4.4-5)

であるので、質量中心系では

$$\int \rho^{2} dV = \frac{N^{2}}{\gamma (4 \pi)^{3/2} \sigma_{x} \sigma_{z} \sigma_{\ell}} = \frac{N^{2}}{\gamma V}$$
(4.4-6)

となる。

.

実験室系に変換すると

$$\mathbf{N} = -\overline{\mathbf{v} \sigma} \quad \mathbf{N}^2 \nearrow \gamma^2 \quad \mathbf{V} \tag{4.4-7}$$

となる。電子数 $N(t)(t = 0 \circ N = N_0)$ の減衰方程式は

$$N(t) = \frac{N_0}{1 + (\overline{v \sigma} / \gamma^2 V) N_0 t}$$
(4.4-8)

で与えられる。電子数Nが初期値の 1 / e になるまでに要する時間を寿命 τ_{T} と定義する と

$$\tau_{\rm T} = \frac{e-1}{N_0 \quad (\overline{v \sigma} / \gamma^2 \, \mathrm{V})} \tag{4.4-9}$$

となり、偏平状ビームでは垂直方向のベータトロン振動の寄与は無視できるため、

$$\frac{1}{\tau_{\rm T}} = \frac{\sqrt{\pi} r_0^2 c \,\mathrm{NC}(\xi)}{(e-1) \sigma_{\rm x}^2 \gamma^3 (\varepsilon_{\rm max} / E_0)^2 \rm V} \qquad (4.4-10)$$

$$C(\xi) = \ell_{\rm n} \left(\frac{1}{1.78\xi} - 1.5\right) \qquad \xi < 10^{-2}$$

$$\xi = \left(\frac{\varepsilon_{\rm max} / E_0}{\gamma \sigma_{\rm x}^2}\right)^2$$

となる。ここで r_0 は電子の古典半径(=2.8 ×10⁻¹⁵m)、 σ_1 は水平方向の発散角、 ε_{max} /E₀は r_f システムが許容しうる最大のエネルギー拡がりである。

NIJI-Iの入射エネルギーを160 MeVとし、動作点 (ν_x , ν_z)=(1.37,1.53)、 V_{rf}= 24 kV、蓄積電流I=200 mAの条件では τ_T ~1minとなる。しかし、低エ ネルギーにおけるビームサイズは計算値よりかなり大きくなると考えられるので τ_T が長 くなることが期待され、事実、蓄積電流としてI>400 mAが得られている。(4.4-10)式 より明らかなように、 Touschek 寿命はバンチサイズに大きく依存するため、電子エネル ギーと蓄積電流の関数として評価⁷⁾しなければならない。

4.4.2 バンチサイズ

(i) ビームサイズの増大

NIJI-Iのビームサイズは、電子エネルギーの低減ならびに蓄積電流の増大ととも にかなり増大する。低エネルギーにおける Touschek 寿命を評価するためにはビームサイ ズを知ることが重要である。

通常ビームサイズは、SR光の放射に伴う電子エネルギーのゆらぎおよび放射減衰より 計算される。しかし、低エネルギーでは多重散乱効果によるバンチサイズの増大が期待で きる。この効果は横方向ビームサイズならびにバンチ長の増大をもたらし、多重散乱、放 射励起および放射減衰による成長(減少)率が平衡状態に達するまで続くことになる。放 射減衰がE³のエネルギー依存性を持っているので、多重散乱効果はEが低くなればなる 程顕著に現れる。低エネルギーでは、自然ビームサイズは極めて小さいので初期成長率は 大きいものとなる。

図4. 4-1 に蓄積電流 I =100 mA, r f 加速電圧 V_{rf}=24k Vにおけるビームサイズ σ_x , σ_z , σ_ℓ の電子エネルギー依存性の計算機シミュレーション結果と実験結果の比 較を示す。計算機シミュレーション結果は、250 - 270 Me Vで (σ_x , σ_ℓ) = (0.5 mm, 50 ~ 60 mm) であったビームサイズが、 100 Me V で (σ_x , σ_ℓ) = (~1 mm, 72 mm), 50Me Vで (σ_x , σ_ℓ) = (2.3 mm, 110 mm) まで多重散乱の寄与により増 大することを示している。 σ_z はカップリング係数K=0.1 を仮定して求めたため、 σ_x と同様の電子エネルギー依存性を示している。しかし、多重散乱効果によるビームサイズ 増大だけでは、実測ビームサイズならびにその電子エネルギー依存性を説明することがで きない。そこで多バンチ運転 (7バンチ) による縦方向バンチ結合不安定性⁹⁾⁻¹³⁾で生



図4.4-1
 ビームサイズの電子エネル
 ギー依存性、多重散乱効果
 を考慮して求めた計算機シ
 ミュレーション結果⁸)と実
 験結果の比較

じるビームサイズの増大について考える。この不安定性は、リング中を周回しているある バンチの真空ダクトのある場所に誘起した電場が、他のバンチに作用してそのバンチを加 速または減速することにより、電子エネルギー分布に共振現象を引き起こすために生じ、 これがビームサイズの増大をもたらす。バンチ間の結合モードは、そのコヒーレントモー ドに対応した誘起電場の作用を受けて成長する。これらのモードは位相平面上をシンクロ トロン振動数で回転するので、ビーム信号をスペクトラムアナライザーで観測するとビー ムの周回周波数の高調波毎に、コヒーレントモードに応じたサイドバンドが現れる。図4. 4-2 に観測したサイドバンドを示す。各モードはシンクロトロン周波数(~200 kHz)だ け離れているのがわかる。この不安定性によって電子エネルギー分布は位相平面上で拡大 するが、蓄積電流によって定まる大きさで平衡状態に達する。これは主にシンクロトロン 振動数の拡がりによる減衰作用が働くためである。



図4.4-2 ビーム強度の周波数スペク トラム(E=163 MeV、 I=150 mA)中心のスペ クトルは135.77MHz 縦方向バンチ結合不安定性による位相平面での電子分布の拡がりに関係したバンチ長な らびに蓄積ビームのエネルギー拡がりの増大について調べる。コヒーレントモードmの成 長速度は、

$$\alpha_{\varepsilon} = \mathbf{I} \ \mathbf{k} \neq \sigma_{\ell}^{3}$$

$$\mathbf{k} = \frac{\sqrt{\mathbf{m}}}{32\pi^{2}} \ \frac{\omega_{0}^{2}}{\omega_{s}} \ \frac{\alpha \ \mathbf{h}^{2} \ \mathbf{L}^{3}}{\mathbf{E} \neq \mathbf{e}} \ \left\langle \frac{Z \ \prime \prime}{\mathbf{n}} \right\rangle$$

$$(4.4-11)$$

で与えられる。ここでLはバンチ間隔、<Z /// n >はリングの長手方向のインピーダン スである。一方、シンクロトロン振動数の拡がりによるランダウ減衰の速度は

$$\alpha_{d} = d \sigma_{\ell}^{2}$$

$$d = \frac{2 \sqrt{m}}{3} \frac{\omega_{s}}{L^{2}} \frac{1 + \sin^{2} \phi_{s}}{1 - \sin^{2} \phi_{s}}$$
(4.4-12)

となる。¹³⁾ ここで ϕ 。は同期位相である。従って平衡状態では $\alpha_s = \alpha_a$ となる。 低エネルギーであることより、シンクロトロン放射減衰による減衰作用は無視できるの でバンチ長は

$$\sigma_{\ell} \nearrow \sigma_{\ell 0} = \begin{cases} (I \nearrow I_{th})^{-0.2} & I > I_{th} \\ I & I \leq I_{th} \end{cases}$$
(4.4-13)

$$\mathbf{I}_{th} = \mathbf{d} / \mathbf{k} \quad (2 \sigma_{\ell 0})^5 \tag{4.4-14}$$

と書ける。ここで I いはこの不安定性の閾値を与える蓄積電流であり、 $\sigma_{\ell 0}$ は自然バンチ 長である。(2.7-11)式および(2.7-12)式より

$$\sigma_{\ell 0} = \frac{c \alpha \gamma}{\omega_{s}} \sqrt{\frac{C_{q}}{J_{\epsilon} \rho}}$$
(4.4-15)

となる。ただし $C_q = 3.84 \times 10^{-13}$ mである。(4.4-14)式に $\sigma_{\ell 0}$, k, dを代入すると

$$\mathbf{I}_{\text{th}} = \frac{64}{3\pi^{3}} \left(\frac{C_{\text{q}}}{J_{\varepsilon} \rho} \right)^{5/2} \frac{h^{3} \alpha^{4}}{\nu_{\text{s}}^{3}} \frac{E^{6}}{m c^{2}} \neq \mathbb{Z} / / n > \qquad (4.4-16)$$

となる。

位相平面上で電子分布が拡がるとエネルギー分布が増大する。NIJI-Iのエネルギー分散関数 η は零でないので、エネルギー分布の増大により水平方向のビームサイズも増大する。水平方向のビームサイズは(2.4-18)式および(2.4-22)式に与えられている。ここでE=160 MeVにおけるパラメータ $\varepsilon_{x0}=0.0216$, $\beta_x \sim 1.6$ m, $\eta \sim 1.0$ m, σ_{ε} / E =2.08×10⁻⁴を用いると、I₁以下の水平方向ビームサイズは $\sigma_x \sim 0.28$ mmとなる。I₁以上においては、(4.4-13)式で与えられる蓄積電流に依存したバンチ長の関係より、エネルギー分布の増大は

$$\sigma_{\varepsilon} / E = (\sigma_{\varepsilon} / E)_{0} (I / I_{th})^{-0.2}$$

$$(4.4-17)$$

となる。ここで添字0は1,1以下でのエネルギー拡がりを示す。

(ii) 蓄積電流依存性

M.S.Zisman¹⁴⁾によって電子エネルギーE=100MeVの Aladdinの場合、縦方向バンチ結 合不安定性のためにビームサイズの増大が生じた後も、引き続き多重散乱による増大の起 こることが計算機シミュレーションで示されている。多重散乱の寄与が小さい電子エネル ギーE=210 MeVと、重畳効果が予想されるE=80MeVについてビームサイズの蓄積電流 依存性を実験により求めた。このときイオンは十分に除去してあり、V_{r1}=24k Vである。 実験結果を図4.4-3 に示す。E=210 MeVでは蓄積電流 I=10mA、100 mAにおいてバ ンチ長は90mm, 140 mmとなる。これは自然バンチ長に対してそれぞれ2.7 倍、4.2 倍



図4.4-3 ビームサイズの蓄積電流依存性(E=80MeV,210MeV)
 (a) σ_ℓ (b) σ_×, σ₂

であり、(4.4-13)式で与えられるように I º ² にほぼ比例しているので縦方向バンチ結合 不安定性と関係づけられる。一方、リングの長手方向のインピーダンスは電子エネルギー に依らず一定であると考えられるので、電子エネルギーの減少に従ってこの不安定性の生 じる蓄積電流の閾値は低減する。また自然バンチ長も短くなる。結果として、Vェィを一定 とした条件ではバンチ長は電子エネルギーにほとんど依存しなくなる。E=210 MeVの実 験結果より、(4.4-13)、(4.4-16) 式を用いて I 、ル , < Z 〃/ n > を求めると、それぞれ 0.05 mA、 99Ω となる。E = 80 MeVの σ_o の予想値を図4.4-3 (a)に実線で示している。この 値は実験結果とよく一致し、E=80MeVの低エネルギーにおいてもバンチ長は縦方向バン チ結合不安定性によって決まっており、予想されたような多重散乱による付加的な増大の 生じていないことがわかる。またσ、の蓄積電流依存性はバンチ長のそれとよく対応して おり、 I º 2 の比例則に従っている。縦方向バンチ結合不安定性によるビームサイズの増 大を示している。低エネルギーでσ、が大きくなるのは、この不安定性の閾値電流の電子 エネルギー依存性が強いためである。更に、縦方向バンチ結合不安定性によって説明でき ない σ_{2} の蓄積電流依存性が強く、 σ_{2} は $\sim I^{\circ\circ}$ に比例していることもわかる。この原 因として、イオンクリアリングを行っているにもかかわらず、蓄積ビーム内の残留イオン が影響を与えているのか、あるいは何か他の不安定性が生じているものと考えられる。こ れらの実験的、理論的解析は今後の課題である。

以上の結果から電子エネルギーにかかわらず、バンチサイズは蓄積電流にほぼ比例する ことになり、 Touschek 寿命は蓄積電流に対してほぼ一定となる。これは着目に値する。 (iii) 電子エネルギー依存性

前述したように、縦方向バンチ結合不安定性によるビームサイズの増大は電子エネルギ ー依存性をもっている。実験結果は図4.4-1 にプロットしてある。ここで注目すべきは、 バンチ長 σ_{ℓ} が電子エネルギーにかかわらずほぼ一定となっていることである。もし多重 散乱効果が支配的であるなら、電子エネルギーの低減とともに σ_{ℓ} は増大するはずである。 従って、縦方向バンチ結合不安定性が σ_{ℓ} を決めているものと考えられる。理論的に $V_{\tau \ell}$ =一定の場合、 $I_{\tau h}^{0-2} \geq \sigma_{\ell 0}$ はともに E^{1-5} の依存性のあることが導かれるため、 σ_{ℓ} =一定が得られ実験結果を支持している。また水平方向ビームサイズは $\sigma_{X} \gg \sigma_{X\beta}$ で あるので $\sigma_{X} \sim \eta$ (σ_{ϵ} / E)。($I / I_{\tau h}$)⁰⁻² となる。ここで (σ_{ϵ} / E)。 $\propto E$ 、 $I_{\tau h}^{0-2} \propto E^{-1-5}$ より $\sigma_{X} \propto E^{-0.5}$ となり、 σ_{X} のエネルギー依存性はこの不安定性で 説明できる。
このリングの電子エネルギーを実用機に要求されるレベルまで上昇可能であると仮定し、 I +hならびにビームサイズについて簡単な評価をする。ピーク波長 λ_P を5 Åとした場合、 偏向半径 $\rho = 0.7 \text{ m}$ であるので(2.2-4) 式より E = 690 Me V となる。 E = 210 Me V におけ るパラメータ I +h = 0.05m A、 $\sigma_{\ell 0} = 30 \text{ mm}$ 、 ($\sigma_{\epsilon} \neq E$)₀ = 2.6 × 10⁻⁴を用い I +h $\propto E^{7.5}$ 、 $\sigma_{\ell 0} \propto E$ 、 ($\sigma_{\epsilon} \neq E$)₀ $\propto E$ の関係より、I +h = 350 m A、 $\sigma_{\ell 0} =$ 99mm、 ($\sigma_{\epsilon} \neq E$)₀ = 8.5 × 10⁻⁴ と求まる。すなわち、I +hが必要とされる蓄積電 流 (I ~ 220 m A) より十分大きいため、E = 690 Me V では縦方向バンチ結合不安定性に よるビームサイズの増大の生じないことがわかる。それ故、水平方向ビームサイズは(2.4 -22)式より $\sigma_{X} \sim$ 1.2 mmとなり、X線リソグラフィに要求される許容ビームサイズ範囲 に収まることを示している。

(iv) r f 加速電圧依存性

通常はrf加速電圧として比較的高い入射効率が得られているV_{rf}=24 kVを経験的に 用いている。ビームサイズの蓄積電流ならびに電子エネルギー依存性を確認したので、次 に電子エネルギーをE=110 MeV、蓄積電流をI=100 mAに固定して、rf加速電圧 V_{rf}の大きさを変えることによりビームサイズのV_{rf}依存性を調べた。ここで扱うV_{rf}は 電子の放射損失Uに比して十分大きいため、シンクロトロン振動周波数は(2.7-9) 式によ りV_{rf}^{0.5} に比例する。そこで縦方向バンチ結合不安定性が生じている場合の σ_{ℓ} 、 σ_{χ} はそれぞれV_{rf}^{-0.2}およびV_{rf}^{0.3} に比例すると推定できる。実験結果を図4.4-4 に示す。 このように σ_{ℓ} 、 σ_{χ} は、ほぼ比例則で説明できるのに対し、 σ_{χ} はV_{rf}依存性をほとん ど示さない。これよりバンチ体積はV_{rf}によってもそれほど変化しないことが確認できた。



図 4 . 4 - 4 ビームサイズの r f 加速電 圧依存性 4.4.3 蓄積ビーム寿命の評価

(i) 蓄積電流減衰率の測定

リング内の蓄積ビームは Touschek 効果、イオントラッピング効果、中性ガス分子との 散乱ならびに量子的ゆらぎによって安定軌道から外れ、蓄積電流は減少していく。量子的 ゆらぎは r f 加速電圧が十分高いので無視できる。

実際的な課題としては、低エネルギーでの Touschek 寿命を評価することである。ここでは先に述べた要因が寿命に及ぼす影響の程度を蓄積電流に対して定量的に求めるのに有用な蓄積電流減衰表示法¹⁵⁾ について述べる。

図4.4-5 に種々の電子エネルギーにおける蓄積電流Iに対する蓄積電流減衰率(-dI/dt) を示す。 実験においては蓄積ビーム中にトラップされるイオンが (-dI/dt) に及ぼ



図4.4-5
 種々の電子エネルギーにおける蓄積電流に対する蓄積
 電流減衰率

す影響を極力避けるために、BPM3個にVdc=-1kVを印加した。低電流領域(<50mA)では、イオンおよびSR光による放出ガスの影響が小さく、すべての電子エネルギ ーで(-dI/dt)はIにほぼ比例する傾向を示している。これは上に述べたバンチサイズ がIにほぼ比例することとよく一致し、測定した(-dI/dt)は主に Touschek 効果によ るものであることを裏付けている。

a)中性ガス分子との散乱による減衰

蓄積ビームの中性ガス分子との散乱による蓄積電流減衰率 | -dl/dt | v は

と表すことができる。ここでPはリング内の真空度、kは定数である。また、リング内の 真空度Pは、ビームが蓄積されていない時の残留ガスによる成分P。とSR光によるガス 放出成分aIによって

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_{0} + \mathbf{a} \mathbf{I} \tag{4.4-19}$$

で与えられる。ここでaは定数である。一例として、図4.4-6 に蓄積初期の電子エネルギ - E = 163 MeVにおける蓄積電流 I と測定したリング内真空度 Pの関係を示す。この時の



図4.4-6 蓄積電流に対するリング内 真空度変化の代表例、ベー スガス圧力 P。=1.18 nTorr, △P=1.27×10⁻² nTorr/mA

(4.4 - 18)

ベースガス圧力 P 。は1.18 nTorrで、ガス放出による圧力上昇は1.27×10⁻² nTorr/mA であった。測定圧力は (4.4-19) 式で示される曲線とよく一致している。(4.4-18)、(4.4-19)式より

 $|-dI/dt|_{v} = k I (P_{o} + a I)$ (4.4-20)

となり、第2章2.8 節で述べた散乱断面積を用いて

 $|-dI/dt|_{v} = (\sigma_{1} + \sigma_{2} + \sigma_{3}) d_{m} c \beta I$ =3.22×10²² ($\sigma_{1} + \sigma_{2} + \sigma_{3}$) c βI (P₀ + a I) (4.4-21)

と書き直すことができる。ここで d_m は中性ガス分子密度である。すなわち、リング内の 真空度に依存する $|-dI/dt|_v$ は I^2 に比例するものと I に比例するものの和になる。

NIJI-Iでは真空チェンバー内の主要ガス成分は、マススペクトラム測定の結果よ

りCOとH₂ であり、その分圧比はほぼ1:1である。低エネルギーになるにつれて散乱 断面積は増加するが、SR光によるガス放出が減少するため、真空状態が良好であれば $|-dI/dt|_v$ は蓄積ビーム寿命を制限する主要因とはならない。現時点においては、電 子エネルギーE=150 MeV、蓄積電流 I=100 mAの時、リング内の真空度は約1 nTorr であり、この時の $|-dI/dt|_v$ は0.3 (mA/min)であった。測定した蓄積電流減衰 率|-dI/dt|の約15%と見積られる。

b) Touschek 効果による減衰

電子-電子の二体衝突による減衰であるので、 | -dl/dt | τ は

 $|-dI/dt|_{T} = \alpha I^{2} \qquad (4.4-22)$

で与えられる。ここでαは(4.4-10)式により

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi} r_0^2 c C (\varepsilon)}{\gamma^3 \sigma'_x (\varepsilon_{\max} / E_0)^2 V e f_{rf}}$$
(4.4-23)

と表すことができる。ここでeは電子の電荷、frtはrf周波数である。

c)イオントラッピング効果による減衰

イオントラッピング効果の蓄積ビーム寿命に及ぼす影響としては、ベータトロン振動数 がビームロスを招くような危険な共鳴線にシフトしない限りにおいては、トラップされた イオンとの衝突による減衰ならびに垂直方向のビームサイズの増大に伴う Touschek 効果 の緩和が相乗して蓄積ビームに減衰を与える。

トラップされたイオンの密度 d; は(4.3-24)式に示すように、ベータトロン振動数のシ フト量より得られる。従ってイオントラッピングによる蓄積電流減衰率 | - dI/dt |; は

 $|-\mathrm{d}I/\mathrm{d}t|_{1} = (\sigma_{1} + \sigma_{2} + \sigma_{3}) \,\mathrm{d}_{1} \,\mathrm{c}\beta \,\mathrm{I} \qquad (4.4-24)$

で求められる。ここで σ_1 , σ_2 , σ_3 は各々イオンを構成する原子中の電子とのM ϕ ller 散乱、原子核との Rutherford 散乱、制動輻射の各過程で蓄積ビームが失われる断面積で ある。

図4.4-7 に電子エネルギーE=150 MeVでのイオンクリアリング電圧Vdcを変えた場合の蓄積電流減衰率の変化を示す。実線は測定した蓄積電流減衰率|-dI/dt|,破線は(4.4-24)式により見積った|-dI/dt|;である。蓄積電流I = 20 - 150 mAの範囲におい



図4.4-7
dcイオンクリアリング電
EVdc=0kV,-0.2
kV,-0.4 kVの場合の
蓄積電流減衰率、実線:測
定値、破線:ベータトロン
振動数のシフト量より(4.4
-24)式を用いて求めた計算
値(E=150 MeV)

て、イオンクリアリングがない場合の方がある場合に比して | -dI/dt | が小さい。これ は垂直方向のビームサイズがトラップされたイオンのために増大し、 Touschek 効果が小 さくなるためと考えられる。それ故、この蓄積電流領域においては、トラップされたイオ ンによる散乱よりもビームサイズの変化に伴う Touschek 効果の方が支配的であることを 示している。しかし、I>150 mAでVdc=0の場合は、蓄積電流の増加につれて |-dI/dt| はかなり増大する。このように減衰の大きくなる大電流領域においては、イオンクリアリ ングを行うことにより | -dI/dt | を低減でき、蓄積ビームの寿命を長くすることができ ることは明らかである。大電流蓄積のためにはイオンクリアリングは不可欠であるが、実 験結果はVdcに最適条件があることを示している。

(ii) Touschek 寿命の評価

低エネルギー電子の Touschek 効果によるビーム減衰は次式で評価できる。

 $|-dI/dt|_{T} = |-dI/dt| - |-dI/dt|_{i} - |-dI/dt|_{v}$ (4.4-25)

ここでは大電流領域におけるイオンの寄与を十分に除去できるVdc=−1kVを印加した。 図4.4-8 は | −dI/dt | を各減衰要因に分離した例を示す。この図に●印で示すように |−dI/dt | ^T はバンチサイズの蓄積電流依存性より予想された通りIにほぼ比例している。 従って、Touschek 効果による寿命は



図4.4-8
蓄積電流の減衰要因の分離例
○:測定値、
●: Touschek 効果
-----: 中性ガスによる散乱
-----: イオンによる散乱

 $\tau_{T} = I / | -dI / dt |_{T}$

(4.4-26)

で与えられ、蓄積電流値に依らずほぼ一定となる。

電子エネルギーEを変化させた場合の $|-dI/dt|_T$ の変化の様子を図4.4-9 に示す。 これからも $|-dI/dt|_T$ はすべてのEで $|-dI/dt|_T \propto I + const$ の形で変化していることがわかる。しかし、80MeVで生じる速い減衰(図4.4-5)は100 MeVでも観測されており、この原因は $|-dI/dt|_T$, $|-dI/dt|_V$ では説明できず、その原因は何であるかを結論するためには更に詳細な実験が必要である。



図4.4-9
 電子エネルギーをパラメー
 タとした Touschek 効果に
 よる蓄積電流減衰率

Touschek 寿命 τ_{T} の電子エネルギーEに対する依存性を図4.4-10に示す。図中の実線 は測定したバンチサイズを用いて(4.4-22)および(4.4-23)式より求めた。この値はエラー バーで示した蓄積電流減衰率の測定から I / | -dI / dt | τ で求めたものと比較的良く一 致しており、両者ともE=150 -180 MeV付近で τ_{T} の極小値をとる。電子エネルギーの 低減につれて τ_{T} が増加するのは、バンチサイズが増大することと関係づけられる。結果 として、Bruck の式は種々の仮定ならびに近似を含むにもかかわらず、低エネルギー大電 流領域の Touschek 寿命を評価するのに十分有効であることがわかった。

また、縦方向バンチ結合不安定性が生じず、多重散乱効果のみによるτ_Tを確認するため I =100 m A での計算機シミュレーション結果を破線で示してある。多重散乱によるビ ームサイズの増大だけでも低エネルギーで大電流蓄積が可能であることを示しているが、 低エミッタンス化を狙わない小型リングの場合、低インピーダンス化を行わない方がむし ろ縦方向バンチ結合不安定性により長寿命化が図れることを示唆している。



 $\boxtimes 4. 4 - 10$

Touschek 寿命 τ_{T} の電子 エネルギー依存性、破線は 計算機シミュレーション結 果⁸⁾ (I=100 mA)、実 線は実測ビームサイズを用 いて(4.4-23)式より求めた。 エラーバーは蓄積電流減衰 率より求めた実験結果を示 す。

(ⅲ) まとめ

この項の結果をまとめると次のようになる。

- 1) 蓄積電流減衰率を測定し、減衰の要因を定量評価した。
- 2)イオンクリアリングにより垂直方向ビームサイズが減少し、イオンによる散乱の低減効果より Touschek 効果の増加が顕著になり、蓄積ビーム寿命が短くなる電流領域がある。

- 大電流領域ではイオンクリアリングは有効であるが、クリアリング電圧に最適条件 がある。
- 4) 低エネルギーの蓄積ビーム寿命を決める主要因は Touschek 効果である。
- 5)縦方向バンチ結合不安定性等が決めるビームサイズは蓄積電流にほぼ比例するため、 Touschek 寿命は蓄積電流に依らず一定となる。
- 6)低エネルギーにおいて Touschek 寿命は十分長く、大電流蓄積が可能であることが 判明した。
- 7) Bruck の式は低エネルギー大電流領域においても、 Touschek 寿命を評価できることがわかった。

4.4.4 低エネルギーに起因する減衰増大機構

蓄積電流減衰率の測定において、100 MeV以下の大電流領域(>150 mA)で生じる速 い減衰の蓄積ビーム寿命に与える影響は無視し得ない値であるため、何らかの損失防止対 策を必要とする。そこで以下の低エネルギーに起因する減衰増大機構を解明するための実 験を行った。

(i) 実験的検討(I)

エネルギー分散関数 η が零でないリングの長直線部に r f 加速空胴が設置されているの で、シンクロ・ベータトロン共鳴によりビーム減衰が起こっている可能性がある。前節の 実験により、十分なd c クリアリングを行った場合でも、残留イオンによるベータトロン 振動数のシフトを生じている。 $\Delta \nu_x$ および $\Delta \nu_z$ ともに動作点より高い方にずれている ので、次の関係を満たす共鳴線がある。

$$\nu_{x} + \nu_{z} + m \nu_{s} = 3 \qquad (4.4-27)$$

ここでv。はシンクロトロン振動数、mは整数である。

低エネルギーになる程、通常ではビーム損失を生じない高次のシンクロ・ベータトロン 共鳴線において損失の生じることが考えられる。そこで電子エネルギーE=100 MeVおよ びE=150 MeVについて、残留イオンの造る非線形電場によるベータトロン振動数の拡が りも含めたシフト量を測定した。実験条件は V_{rf} =24kVであり、Vdc=-0.4 kV (100 MeV)、-1 kV(150 MeV)を3個のクリアリング電極に印加した。Vdc=0 kV の場合についても参考のために測定した。 実験結果は図4.4-11に示すように、 I ~200 mAではシフト量としては大差なく $\Delta \nu_{\star}$ ~2×10⁻³, $\Delta \nu_{\star}$ ~1×10⁻²であることがわかる。

図4.4-12にシンクロ・ベータトロン共鳴線図を示す。上述の実験結果より、m=5,6の 共鳴線にかかっていることが予想される。そこで4極電磁石Q_F、Q_Dの収束力を変化さ せることにより、動作点(O.P)より ν_x 、 ν_z を変え、図中に示した点上を移動させ た。蓄積電流はI=45~105 mAである。各点における蓄積電流減衰率を測定するととも



図4.4-11 蓄積電流に対するベータトロン振動数のシフト量および拡がり



図 4 . 4 - 1 2 シンクロ・ベータトロン共 鳴線図

にビームプロファイルをシリコンフォトダイオードで観測した。

共鳴線上ならびに共鳴線間において、I / | -dI / dt | として求めた蓄積ビーム寿命を 図4.4-13に示す。



図4.4-13
 シンクロ・ベータトロン共鳴
 線上ならび共鳴線間における
 蓄積ビーム寿命

この結果は、ベータトロン振動数がm=1,2の線上にあるとき、電子エネルギーの違い に依らず急激なビーム減衰を起こす。またm=3以上の高次共鳴線上では、電子の水平方 向の振動と垂直方向の振動は結合を起こし、水平方向の振動エネルギーの一部は垂直方向 に移動し、その振幅を大きくすることになる(図4.4-14)。この結合は特にm=3,4 で顕 著であり、ビームサイズの増大により蓄積ビーム寿命は格段に長くなる。



 $\boxtimes 4. 4 - 14$

シンクロ・ベータトロン共鳴 のビームプロファイルに及ぼ す影響、(1)m=4線上(I= 56mA)、(2)m=3-4の線 間(I=54mA)、(a)、(c)は 水平方向、(b)、(d)は垂直方向 のビームプロファイルを示す。

シンクロ・ベータトロン共鳴のmによるビーム減衰の電子エネルギー依存性は若干認め られるが、傾向はおおむね同様である。低エネルギー(≦100 Me V)の場合、十分なイオ ンマネジメントをしている限り、ベータトロン振動数の拡がりを考慮してもシフト量はm =5の共鳴線までであり、ビーム減衰の増大機構はシンクロ・ベータトロン共鳴によるも のではないことがわかった。

しかしながら、この実験から得たシンクロ・ベータトロン共鳴に対する情報は重要で、 実用機である超電導小型電子蓄積リングの設計に際して、シンクロ・ベータトロン共鳴を 低減して、より広い動作点の安定領域を確保するという意味から、rf加速空胴を設置す る直線部分ではエネルギー分散関数が零となるようにアクロマティクラティスを選定すべ きであるとの指針を得ることができた。

(ⅲ)実験的検討(Ⅱ)

低エネルギー大電流領域で発生するきわめて速いビーム減衰は、コヒーレントな不安定 性によると予想できる。この不安定性の原因として、リングのインピーダンスが関与して いるものと考えられる。インピーダンスとしては次の2種類がある。

- バンチが高いQ値を有するrf加速空胴を通過するとき、電場を誘起し、これが引き続くバンチに作用する。バンチ間に適当な位相関係があればこの作用は成長する。
 このインピーダンスは減衰の遅いウェークフィールドに相当する。
- ② Q値の低い真空ダクトに誘起する電場は、次のバンチに影響を与えず通過している バンチにのみ作用する。このインピーダンスは減衰の速いウェークフィールドに相 当する。

コヒーレントな不安定性を抑制するためには、①では蓄積ビームと相互作用を起こして いる高次モードのシャントインピーダンスを下げることのできるdamping アンテナ¹⁶)を 空胴内に入れたり、シンクロトロン振動数の拡がりを人工的に大きくするためのLandau空 胴¹⁷⁾を導入したりする。②ではhead-tail 効果¹⁸⁾を避けるためのクロマティシティを 補正する6極電磁石やLandau dampingを起こさせるための8極電磁石を用いたり、真空ダ クトをスムースにしてインピーダンスを小さくするなどの対策がとられる。そこでまず① による不安定性であるかどうかを調べるため、r f 加速空胴に取り付けたサンプリングル ープ(電界結合型、磁界結合型を設置)を用いて、速いビーム減衰の生じる150 mAを境 にしてスペクトラムアナライザーにより高次モード発生を観測した。速いビーム減衰が起 こっている場合のE=100 MeV、I=267 mAでの周波数スペクトラムを図4.4-15に示す。 基本モードの第5高調波と蓄積ビームとの相互作用は認められるものの、速いビーム減衰 の有無によるピーク値の違いは顕著には観測されず、①に起因するビーム不安定性でない ことがわかった。



図4.4-15 速い減衰の生じている時に 観測した周波数スペクトラ ム(E=100 MeV、I= 267 mA)中心スペクトル 500MHz、100MHz/div

NIJI-Iには②による不安定性に対する対策を施せる直線部スペースが確保できないため、コヒーレントな運動を安定化する非線形力を発生させ得る手法について検討した。 ベータトロン振動を励起した場合、リングの電磁石類の多極成分により、ベータトロン振幅に依存した非線形力を生じさせることができることを見い出し、その効果を確認するための実験を行った。RF-KO電極にrfパワーアンプ(KALMUS 128CA)より垂直方向ベータトロン周波数に一致したf_z~9.83MHz、rfパワー10Wを供給し、ベータトロン振動数の拡がりを増加させた。rf_{or}の場合について測定した蓄積電流減衰率を図4.4-16に示す。



図4.4-16
 ベータトロン振動励起の有
 無による蓄積電流減衰率の
 違い

実験条件は電子エネルギーE=100 MeVおよびE=150 MeV、V_{r1}=24kVであり、Vdc =-0.4kV(100MeV)、-1kV(150 MeV)を3個のクリアリング電極に印加した。図に 示すように100 MeVの大電流領域で生じる急激なビーム減衰は抑制された。更に、低エネ ルギーの大電流蓄積にとってきわめて好都合であるのは、ベータトロン振動励起法はビー ム振幅をコヒーレントに大きくするが、Landau dampingによりビームサイズも大きくなる ため蓄積電流減衰率を小さくできることである。ビームサイズの増大と蓄積電流減衰率の 低減とが対応することは確認してあり、100 MeV以下の入射蓄積実験に本方法を採用して いる。しかしながら、ビーム不安定性は多々あり、最も疑わしいhead-tail 不安定性を同 定するための実験も行ったが明確に判別できなかった。低エネルギーに起因するこのコヒ ーレントな不安定性を説明するには、測定手段の改良を含め、更に詳細な実験が必要であ り今後の課題である。

4.5 高頻度入射

低エネルギー入射の難しさは、ベータトロン振動の放射減衰が遅いことにある。そのた め繰り返し入射時間間隔を長くする必要があり、この時間に蓄積ビーム損失を生じ蓄積電 流が制限されたり、入射に長時間を要することになる。¹⁾ 従って、電子入射の高頻度化の 研究が望まれる。

この節では、入射頻度を上昇させた場合の入射効率に及ぼす影響ならびに高頻度入射を成し遂げるための効果的な手法について述べる。

4.5.1 入射エネルギーとベータトロン振動の減衰時間

リングに入射された電子がSR光を放射することによりエネルギーを失うにつれて横方 向の運動量が減少し、ベータトロン振動の振幅が時間とともに指数関数的に減衰してゆく。 このベータトロン振動の減衰時間はリングパラメーターと入射エネルギーに依存する。

ベータトロン振動の水平方向および垂直方向の放射減衰時間 τ_x , τ_z は電子エネルギ ーEの3 乗に逆比例し、電子のリング内周回時間Tに比例する。従って低エネルギー入射 では、ベータトロン振動が収まるまでの時間が急激に増加する。NIJI-Iについて計 算した結果が図4.5-1 である。図中にシンクロトロン振動の減衰時間 τ_e もあわせて示し ておく。160 MeV入射では $\tau_x \sim 0.1$ s, $\tau_z \sim 0.1$ 7s であり3pps入射を標準としているが、 50MeV入射の場合は $\tau_x \sim 3.1$ s、 $\tau_z \sim 5.3$ sとなり、実に1/30程度の入射頻度とせざるを



図4.5-1 放射減衰時間と電子エネル ギーの関係、 τ_x , τ_z : 水平およひ垂直方向のベー タトロン振動の減衰時間、 τ_{ε} :シンクロトロン振動 の減衰時間

得ないことがわかる。

そこで、まずベータトロン振動の減衰時間の測定を行った。160 MeV入射でビームを蓄 積した後、インターロッキングコントローラーを用いて電磁石の磁場を減少させ蓄積エネ ルギーを50MeVとした。次に、マニュアルでキッカー電磁石を励磁して蓄積ビームに水平 方向の摂動を与え、その振動が減衰する時間をピンホールとシリコンフォトダイオード (SPD)の組合せを用いてSR光の強度変化として観測したところ、図4.5-2 のようにな った。この時の蓄積電流は約15mAである。出力変化のピークから1/e になる時間は3.3s であった。この実験方法は水平方向ベータトロン振動の減衰時間τ、の測定に相当するの で、実測値は計算値と良い一致を示していることがわかる。



図4.5-2
 蓄積ビームの水平方向にキ
 ッカーパルスを用いてキッ
 クを与えた場合のSR光強
 度の時間変化(E=50MeV)

4.5.2 入射頻度上昇の効果

入射頻度をベータトロン振動の減衰時間から決まる頻度より上昇できれば、低エネルギ ー電子の蓄積速度は、より向上することが考えられる。

一般に、既設の電子蓄積リングは多重回転入射により250 MeV以上のエネルギーで入射 している場合が多い。これらのリングでは、ベータトロン振動の減衰時間は短く、Touschek 寿命も十分長いので入射頻度は制約とならず、数pps 入射で一連の打ち込みに要する時間 は数min 程度であるため、理論ならびに実験による研究は行われてこなかった。この頻度 上昇の効果は、ウイスコンシン大学の1GeV電子蓄積リングAladdin で始めて観測された。 このリングへの入射エネルギーは100 MeVであるため、ベータトロン振動の減衰時間は約 10s となり、入射頻度は約0.1ppsであった。しかるにマシンスタディの時点で入射頻度を 1.2ppsに上げたところ蓄積速度が向上し、約2倍の蓄積電流が得られたとのことであるが、 この理由は不明であると報告されている。²⁾

従って、更に低エネルギー領域における入射頻度上昇の効果を、実用的規模に近いNI JI-Iで確認しておくことは、入射エネルギーを設定する上からも重要な基礎資料とな るため、実験により検討を行うことにした。³⁾

(i)実験方法と実験結果

実験は入射エネルギー90Me V で行った。この入射エネルギーでの水平方向ベータトロン 振動の放射減衰時間 τ x は約0.6sであり、従来の入射頻度は約1.6ppsが標準であった。入 射頻度上昇の効果を明らかにするために最高入射頻度はこの約10倍の15pps とした。キッ カー電源の出力電流値が制限を受けるためピーク電流を下げる必要があり、この頻度まで 入射実験を可能にするには、90Me V のビームに対するキック角のピーク値を約-9 mrad に選ばざるを得なかった。その他の入射に係わるパラメータを表4.5-1 に示しておく。

表4. 5-1 入射に係わるパラメータ

水平方向 ベータトロン振動数 垂直方向 ベータトロン振動数 セプタム入射窓の位置 セプタム隔壁の位置 キッカーパルス	ν×~1.37 ν₂~1.57 中心軌道より40mm 中心軌道より28mm
波 形	減衰正弦波
半 波	0.7 μs
減衰時定数	~0.7 μs

電流蓄積速度の入射頻度依存性を図4.5-3 に示す。ここでの電流蓄積速度はすでに蓄積 されているビームの減衰率を差し引き、蓄積電流値に依存しない量に補正してあり、2.5 pps の場合の値で正規化している。電流蓄積速度は5pps付近まではほぼ直線的に増加して おり、5 pps を越えると徐々に直線から離れる。しかし、15pps でも電流蓄積速度は2.5 pps の場合に比べて約3倍まで上昇した。この上昇は高繰り返しによる急激な効率低下を 緩和する放射減衰以外のメカニズムが存在していることを示唆している。



図4.5-3 電流蓄積速度の入射頻度 依存性

(ii)実験結果の検討

入射頻度上昇の効果を定量的に把握するために、キッカーパルスの作用が入射効率なら びに電流蓄積速度に及ぼす影響を検討するビームトラッキングを行った。トラッキングで は入射ビームの位置、エミッタンスを初期条件として与え、ラティスの伝送行列より入射 後のビームの位置、発散角を逐次計算して行く。キッカー波形は減衰正弦波であり、入射 ビームはキッカー電磁石の位置に達した時にその時刻に相当するキックを受ける。再び入 射点に戻った時にセプタム位置より大きな振幅を持つビームは失われるとして、残ったビ ームのみを更に追跡する。この操作を何周も繰り返し、2回目のキッカーパルスを作用さ せた後の残留ビーム量から入射効率を求めた。この際、入射間隔の間の放射減衰は考慮し てある。3回目以降の引き続くパルスによるビームロスについては、2回目までのパルス で大振幅を持つビームはすでに失われており、加えて放射減衰によりエミッタンスの縮小 が進むことから実際上重要でなくなるため無視した。

トラッキングにおける計算条件には表4.5-1 のパラメータを用い、入射ビームのエミッ タンスは10 π n m・rad を仮定した。図4.5-4 は2回目のキッカーパルスを作用させた時 に起こるビームの振動振幅が、二つのビームが作用前に水平方向位相平面上の同一エミッ タンス内にあっても、その位相により大きく変化することを示している。ただし、キック 角は一例として-20 mrad の場合を取り扱った。位相の違いの入射効率に与える影響を 見るために、2回目のキッカーパルス直前の位相が 0,0.5 π , π , 1.5 π の各場合につい



図4.5-4 水平方向位相平面上におい て2回目のキッカーパルス の作用により生じる蓄積ビ ームの振動の様子(キック 角のピーク値-20mrad の 場合)斜線のビーム位置は 初期位相を示し、上図の位 相ではセプタムに衝突して 失われる。

て入射効率の入射頻度依存性を示したのが図4.5-5 である。位相によって入射効率が零と なる入射頻度の値は大きく異なる。図4.5-6 はこの両極端の位相0.5π,1.5πの場合のビ ーム振動振幅をプロットしたものである。これよりキッカーの作用が振幅を増大あるいは 縮小させる効果⁴¹を持っていることがわかり、これが入射頻度依存性を大きく変化させて いると考えられる。実際の運転においてこれらの位相関係はランダムに生じるため、入射 効率は各位相の場合の平均を取り評価するのが妥当と考えられる。従って前述の振幅を縮 小させる位相の寄与によって、放射減衰時間よりもかなり短い時間間隔の入射頻度でも入 射 効率は零にはならない。



図4.5-5 位相条件をパラメータとし た入射効率の入射頻度依存 性、@ **@** @ **@** dt キッカーパ ルスを作用させる直前の位 相平面上の蓄積ビーム位置 0.5π, π, 0, 1.5πを示 す。



Number of revolutions

図4.5-6

 2回目のキッカーパルスを 作用させた時のリング内周
 回数に対するビーム位置、
 1回目のパルスによる残留
 初期最大振幅(破線)±10
 mm、キック角のピーク値
 -20mrad、(1)、(2)は図4.
 5-5の(2)、(2)の場合である。

入射ビームのエミッタンスが最初の数周のうちにセプタムに衝突して失われないように、 通常キッカーのキック角は入射ビームをセプタムの十分近傍の軌道まで移動できる値に選 ばれる。しかしながら入射頻度が上昇すると、1回目のパルスで蓄積状態に入ったビー ムの振幅が十分減衰していないために、2回目以降のキッカーパルスのキック角が入射効 率を左右する重要なファクターとなると予想される。そこで、キック角をパラメータとして トラッキングにより求めた入射頻度に対する効率の関係を図4.5-7 に示す。1回目のキ



図4.5-7

キック角をパラメータとし た入射効率の入射頻度依存 性、位相条件に対しては図 4.5-5 の @ **⑤** © **@** の平均 を用いた。 ッカーパルスで最も高い入射効率の得られるキック角-20mrad の場合、放射減衰時間 τ、の逆数近傍で急激に効率が減少する。キック角が低下すると1回目のパルスによる入 射効率は落ちるが、2回目のパルスによるビームロスは低減し、効率低下が始まる入射頻 度は上昇する。実際の入射で問題とすべきは電流蓄積速度に相当する量である入射効率と 入射頻度の積であり、この入射頻度依存性を示したのが図4.5-8 である。-20mrad では



 図4.5-8
 キック角をパラメータとした
 た電流蓄積速度の入射頻度 依存性

電流蓄積速度も 1/ τ、近傍で低下し始め、従来言われている通り 1/ τ、が入射頻度の 上限の目安となることを示している。しかしながらキック角を-15mrad まで下げると電 流蓄積速度は 1/ τ、より約2倍高い入射頻度まで上昇を続け、最高電流蓄積速度は-20 mrad の場合に比して約60%増大する。更にキック角を減らし、実験を行った-9 mrad の場合、1回目のパルスによる入射効率の低下が支配的となるが、電流蓄積速度の増加が 認められる入射頻度は最も高い。ただし、このトラッキング結果では5ppsを超えると電流 蓄積速度は低下を始めるが、実験結果では低下を生じていない。この原因としては、第1 にセプタム真空槽の設置誤差やCODによって入射ビーム位置と中心軌道位置の距離が設 計値からずれている可能性が考えられる。トラッキングによれば、この距離が大きくなる と計算結果も実験結果に近づく傾向にあり、実験結果をある程度説明できる。この他の原 因としては、ベータトロン振動とキッカーパルスの位相の偏り、入射ビームのエネルギー のずれや拡がり、キッカーパルス長の寄与、入射ビームエミッタンスの変形や変位および ベータトロン振動に対する非線形効果なども考えられる。

(iii) まとめ

以上低エネルギー入射による入射頻度上昇の効果の実験結果とその検討を述べてきた。

この節で明らかにした項目は次の通りである。

- 1) ベータトロン振動の放射減衰時間から決まる入射頻度より更に高頻度入射が可能な ことがわかった。
- 2)入射効率ならびに電流蓄積速度はキッカー電磁石のキック角ならびにベータトロン 振動とキッカーパルスの位相に強く依存する。
- 3) ベータトロン振動とキッカーパルスの位相関係によっては、残留ベータトロン振動 振幅を低減できることがわかった。
- 4)最初のキッカーパルスによる入射効率に着目するよりも、引き続くパルスでの効率 低下を緩和するようにキック角の最適化を行う方が、高頻度入射が可能となり、ト ータルとして高い電流蓄積速度が得られることを明らかにした。
- 5) 電流蓄積速度の入射頻度依存性に関するモデル計算を行い、実験結果の傾向をほぼ 説明できた。

NIJI-Iの90MeV、5ppsの入射実験では~300 mAの蓄積電流を得るのに約1h要 しているが、計算機シミュレーション結果から推定するに約10min 程度に短縮されるもの と期待できる。

4.6 むすび

低エネルギー入射よる大電流蓄積を制限する現象としては、蓄積ビーム寿命の短縮、ビ ーム不安定性ならびに入射頻度の低下があり、既存の装置を用いた研究では、それらの現 象の解決の糸口はある程度つかめても、低エネルギーでの本格的な実験は行われて来なか った。本研究では低エネルギー入射研究用の専用機であるNIJI-Iを開発することに よって、低エネルギー入射蓄積に関して次の点を明らかにした。

- 1) イオントラッピング現象の解明
 - 蓄積ビーム内にトラップされるイオンのリング内真空度依存性を求め、ほぼ比例則が成 り立つことを見い出した。低エネルギーになる程、SR光による放出ガスが低減し、更 にビームサイズも増大することからイオンクリアリングが容易に行えることを明らかに した。
- 2) 蓄積ビーム寿命

低エネルギーにおける Touschek 寿命を求めるため、多重散乱効果を考慮したモデル計 算と実験結果を対応させた。実験では Touschek 寿命を決定づけるビームサイズならび に蓄積電流減衰率を測定した。ビームサイズに関してはビーム損失を生じない縦方向バ ンチ結合不安定性による増大が起こっていることがわかった。多重散乱効果だけでも大 電流蓄積を可能とする寿命が得られるが、縦方向バンチ結合不安定性を抑制する対策を とらない方が蓄積電流を高く出来ることを明らかにした。

3) 速いビーム減衰の低減

コヒーレントな不安定性抑制対策としてはベータトロン振動を励起することによるLandau damping の発生が有効であることを実験で明確にした。また、この不安定性は高いQ値のrf加速空胴に誘起される減衰の遅いウェークフィールドではなく、低いQ値の真空 チェンバーの凹凸部に誘起される減衰の速いウェークフィールドに起因することがわかった。

4)入射頻度上昇の効果

高頻度入射を検討するためのモデルを作り、電流蓄積速度の実験結果と対応させた。キ ッカー電磁石によるキック角と蓄積ビームの位相に関して、電流蓄積速度と入射頻度の 関係を明らかにした。

実用機のプロトタイプ装置である超電導小型電子蓄積リングの開発が進められている現 在、本章の研究より得られた成果は、電子入射器の小型化が可能なことを示しており産業 用小型SR光源の実現に寄与するところ大で、その工業的意義はきわめて大きい。 参考文献

4.1節

- 1) J. Le Duff, Nucl. Instrum. Method. A239, 83 (1985).
- 2) R. D. Kohaupt, Interner Bricht DESY H 1 71/2 (1971).
- 3) 第2章 2.3 節の文献 2).
- 4) F. Sugawara and T. Yamakawa, Circulars of Electrotechnical Laboratory No. 191 (1978).

4.2節

- 1) 第2章 2.1 節の文献 6).
- 2) K. W. Robinson, CEAL 1010 (1964).
- 3) T. Tomimasu et. al., Proc. 6th Symp. Acc. Sci. Tech. (INS, Tokyo, 1987)P. 53.
- 4.3節
 - M. E. Biagini, S. Guiducci, M. Preger, M. Serio and S. Tazzari, Proc. 11th Int. Conf. on High Energy Accelerators, CERN, Geneva, Switzerland (1980) P. 687.
 - Y. Kamiya, M. Izawa, T. Katsura, M. Kihara, H. Kobayakawa and S. Shibata, Proc. 5th Symp. Acc. Sci. Tech. (1984) P. 292.
 - T. Kasuga, H. Yonehara, T. Kinoshita and M. Hasumoto, Jpn. J. Appl. Phys. 24, 1212 (1985).
 - 4) B. Schwarzschild, Phys. Today 39 (3), 19 (1986).
 - 5) E. M. Rowe, Nucl. Instrum. Method. B24/25, 414 (1987).
 - 6) F. F. Rieke and W. Prepejchal, Phys. Rev. A6, 1507 (1972).
 - 7) Y. Baconnier and G. Brianti, CERN / SPS / 80-2 (DI) (1980).
 - 8)4.1 節の文献 2).
 - 9) Y. Baconnier, CERN Report NO. 85-19 (1985) P. 267.
 - 10) Y. Miyahara, J. Vac. Sci. Technol. A5 (5), 2927 (1987).
 - 11) T. Kasuga, Jpn. J. Appl. Phys. 25, 1711 (1986).
 - 12) Y. Yamazaki, M. Kihara and H. Kobayakawa, KEK 83-17 (1983).

13) M. Q. Barton, Nucl. Instrum. Method. A243, 278 (1986).

4.4節

- 1)4.1節 文献 3).
- 2) H. Bruck, Accélérateurs Circulaires de Particules (Presses Universitaires de France, 1966) Chap. xxx.
- 3) U. Völkel, DESY Intrtnal Rept. DESY 67/5 (1967).
- 4) B. Gittelman and D. M. Ritson, HEPL-291 (1963) Stanford University.
- 5) H. Wiedemann, SLAC Internal Rept. PEP Note-27 (1973).
- 6) Y. Miyahara, Jpn. J. Appl. Phys. 24, L742 (1985).
- 7) H. Takada et. al., Proc. SRI-88, Tsukaba, Aug. 28-Sep. 2, (1988).
- 8)計算機シミュレーション結果は五明による。
- 9) D. Boussand, CERN / Lab II / RF / Int / 75-2 (1975).
- 10) C. Pellegrini, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28 (3), 2413 (1981).
- 11) Y. Yamazaki et. al., KEK 83-3, A/p (1983).
- 12) S. Asaoka et. al., Nucl. Instrum. Method. 215, 493 (1983).
- 13) F. J. Sacherer, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-20, 825 (1973).
- 14) M. S. Zisman, LBL-19191 (1985).
- 15) T. Tomimasu et.al., Jpn. J. Appl. Phys. 25, 1706 (1986).
- 16) N. Lehnart and H. Petersen, Nucl. Instrum. Method. 153, 51 (1978).
- 17) Y. Miyahara et. al., Jpn. J. Appl. Phys. 22, L 773 (1983).

18) M. Sand, Rept. SLAC-TN 69/8 and 69/10 (1969).

- 4.5節
 - 1)4.1節の文献 4).
 - 2)4.3節の文献 5).
 - 3) H. Takada et. al., submitted to Jpn. J. Appl. Phys.
 - 4) D. Einfeld and P. R. W. Henkes, Nucl. Instrum. Method. A 267, 547 (1988).

第5章 大面積露光法

5.1 はじめに

X線リソグラフィ光源として最も有望と考えられているSR光の特長は他のX線に比べ 強度が大きく、指向性が強いことである。しかし、SR光の可能な露光範囲は、例えば電 子エネルギー1GeVのリングの場合、電子軌道面に垂直な方向には±0.5 mradと小さ いため、光源から10m離れた地点でも縦± 5mmである。これを解決する手法として図5. 1-1に示す3つに大別して考えることができる。

- 反射鏡による方法
- ② 試料の機械的走査による方法
- ③ 電子軌道を揺動させる方法(電子波動法)



図5.1-1 種々の大面積露光法の模式図

上記①は斜入射による反射鏡を主反射角を中心に振動させることにより上下に振る方法¹⁾⁻³⁾ であり、リングや他のビームラインに影響を及ぼさずに行えることが利点である。一方、 反射率が数+%で強度の損失があること、表面の汚染により反射率が変化すること、真空 中に可動部を有すること、露光強度を一様にするために振り角に応じて鏡の走査速度を制 御する必要があることなどの多くの問題がある。②は試料室側の操作だけですみ、強度の 損失はないが、縦型の高速・高精度ステージの開発を必要とする。③は蓄積ビームの軌道 を時間的に変動する横方向磁場により上下に揺動させる方法⁴⁾⁻⁷⁾であり、蓄積ビーム の変位および傾き角に対応して振らせることができる。この方法は強度の損失がなく変位 や速度の制御が容易で最も魅力のある方法である。

本章ではビームラインの小型化を念頭において、前記のような電子波動法の利点を生か し、かつすべてのビームラインで同時に大面積露光ができる新しい電子波動リングを開発 する目的で行った理論的・実験的研究について記述する。

5.2 電子波動特性

リングの偏向電磁石から放射されるSR光の電子軌道面に垂直な方向への発散角 ϕ は、 電子エネルギーEに逆比例する。

 $\phi \sim 2 \gamma^{-1} = 2\mathbf{m}_{\circ} \mathbf{c}^2 / \mathbf{E}$ (5.2-1)

すなわち、Eが高くなればなる程、露光領域の垂直幅は狭くなってくる。ここで、γは電子の運動エネルギーEの静止エネルギーm。c²に対する比である。電子波動法は、SRリソ グラフィのために電総研で考案され、電子蓄積リングTERASにおいて、初めて実験的検証 がなされたものである。¹⁾ 図5.2 -1 にその原理図の一つを示す。リング中の蓄積ビーム



に、波動用電磁石一個を用いて水平方向に磁場を印加すると、電子の軌道は摂動を受けて 定常的に波打ち、安定した波動の節ができる。この節の近くより取り出されるSR光を用 いれば照射野を拡大することができる。以下、蓄積ビームの波動特性について述べる。

図5.2 -2 に示すようにリング中の蓄積ビームの設計軌道上の一点を座標の原点(X=0, Z=0)にとり、電子の進行方向に沿った軌道長 $s = s_1$ の位置に水平方向(X)磁



図5.2-2電子波動特性の計算座標系

場を発生する波動用電磁石を設置し、角度 ϕ_k のキックを垂直方向(Z)に与えた場合の 任意のs点における蓄積ビームの設計軌道からの変位Z(s)および傾き角Z'(s)は、

$$Z_{L}(s) = \frac{\sqrt{\beta_{Z}(s) \ \beta_{Z}(s_{1})}}{2 \sin \pi \nu_{Z}} \qquad \phi_{K} \cdot \cos(\pi \nu_{Z} - |\phi_{Z}(s) - \phi_{Z}(s_{1})|)$$

$$(5, 2-2)$$

$$Z'(s) = \frac{\sqrt{\beta_{2}(s_{1})}}{2 \sin \pi \nu_{2} \sqrt{\beta_{2}(s)}} \phi_{\kappa} \cdot \{-\alpha_{2}(s) \cos(\pi \nu_{2} - |\phi_{2}(s) - \phi_{2}(s_{1})|) \pm \sin(\pi \nu_{2} - |\phi_{2}(s) - \phi_{2}(s_{1})|) \}$$

(5.2 - 3)

で表される。²⁾ ここで、 β_z (s) は垂直方向ベータトロン関数、 ν_z は垂直方向ベータトロン振動数、 ϕ_z (s) は ϕ_z (s) = $\int_0^s ds / \beta_z$ (s) で示されるベータトロン振動の位相の進み、 α_z (s) は α_z (s) = $-d \beta_z$ /2ds で表される垂直方向のツイスパラメータである。

また、角度 φ κ のキックを生じさせるための波動用電磁石の磁場 Β κ は、

 $\mathbf{B}_{\kappa} = -\mathbf{B} \,\rho \,\phi_{\kappa} \not \ell \tag{5.2-4}$

である。ただし、B、 ρ はリングの偏向電磁石の磁場強度および偏向半径であり、 ℓ は波動用電磁石の長さである。

簡単な見積りをする場合には、(5.2 -2)、(5.2 -3)式で $\beta_z(s) = \beta_0$ (一 定)、 $\alpha_z(s)=0$ とおけば、軌道長に対する位相の進み $\phi_z(s)$ は一様となり、完全な調 和振動で表わすことができる。更に、(5.2.-2)式より 0.5< ν_z <1.5 ($\nu_z =1$ を 除く)の範囲では2箇所に波動の節が生じ、 1.5< ν_z <2.5 ($\nu_z =2$ を除く)の範囲 では4箇所に波動の節が生じることも示される(図5.2 -3)。ところが、節以外のリン グの部分にある各偏向電磁石では、それぞれ変位Z(s)および傾き角Z'(s)ともに異 なったSR光が放射されることになる。



図5.2-3 蓄積ビームの縦波動パターン、完全調和振動と見なし $s = s_1$ に設置した波動用電磁石によりキック角 ϕ_{κ} を与えた場合

5.3 許容ビームサイズ

SR光は平行性の良い光源であるが、有限のビームサイズを持つことにより半影ぼけが 生じる。ビームサイズは高解像度が要求される時には無視しえないパラメータとなる。電 子波動法による蓄積ビームの波動特性を考慮して、許容しうるビームサイズについて検討 する。

水平ビームサイズによる露光領域 2Rに生じる半影ぼけ δ は、波動の有無に依存せず図 5.3 -1 (a) で示される。¹⁾ $6\sigma_x$ を実ビームサイズとした場合の δ は

 $\delta \ge \mathbf{G} \cdot \phi = \mathbf{G} \cdot \mathbf{6}\,\sigma_{\mathbf{X}} \,/\,\mathbf{L} \tag{5.3-1}$

となる。ここで、Gはプロキシミティギャップ、Lは光源とマスク間の距離である。 $\delta \epsilon$ 0.025 μ m以下とするには、G=15 μ m、L= 7mの場合、 $\sigma_x \leq 1.9$ mmとなる。Gを 大きくせざるを得ない時あるいはLを短くしたい時には、より小さい水平ビームサイズが 要求されることになる。



図5.3-1 電子波動法による半影ぼけ、(a)水平方向、(b)垂直方向Z'(s)=0の
 場合、(c)垂直方向Z(s)とZ'(s)が異符号の場合

垂直ビームサイズによる半影ぼけるは、SR光を取り出すビームラインが波動特性のど の位相に設置されているかによって異なる。まず、(5.2 - 2)、(5.2 - 3)式で示さ れる波動の変位Z(s)及び傾き角Z'(s)が同符号の場合を考える。Z(s)/Z'(s) =一定(正)であるので、露光サイドから見るとあたかも設計軌道面上に焦点を結ぶ点に 光源が存在するが如く振舞う。すなわち、振動の節から放射されたSR光と同等と見なす ことができる。この場合、 δ は水平方向と同様(5.3 - 1)式で与えられ、Lが見かけ上 長くなったことに相当するため、許容しうる垂直ビームサイズは水平ビームサイズに比し て緩和されることになる。次に、波動の最大振幅となる点Z'(s)=0より取り出される SR光の場合、 δ は図5.3 - 1(b)に示すように電子エネルギーEにより決まる垂直発散 角*ø*とGのみに依存し、垂直ビームサイズには依存しない。

 $\delta \ge \mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\phi} \tag{5.3-2}$

ここで、 δ が 0.025 μ m以下を満足するEは、 G=15 μ mとした時、E= 612MeVとなる。 更に、Z(s)およびZ'(s)が異符号の場合、 δ は垂直ビームサイズに起因する ぼける。とビーム移動 γ 'に伴うぼける。の和となり

$$\delta = \delta_{s} + \delta_{0} \ge \mathbf{G} \cdot \mathbf{6}\sigma_{z} / \mathbf{L} + \mathbf{G} \cdot \phi \mathbf{L}_{s} / \mathbf{L}_{M}$$
 (5.3-3)

で表される(図5.3 -1 (c))。ここで、L。は移動ビームの光軸が交差する点までの 距離、L_M はその交差点とマスク間の距離である。例えば、G=15 μ m、G・ ϕ =0.025 μ m(E = 612MeV)、L_s / L_M=0.3とした時、 $\sigma_z \leq 1.4$ mmとなる。

以上より、電子波動法を適用した際の許容しうるビームサイズは、光源とマスク間の距離、プロキシミティギャップ、電子エネルギーおよび波動位相などの間の関係によって決まるため、具体的には小型電子蓄積リングNIJI-Iを例にとり調べることにする。

5.4 小型電子波動リング

5.4.1 ベータトロン振動数依存性

電子蓄積リングにおける電子の軌道は、リングを構成する電磁石類の配列(ラティス) により決まる。小型電子蓄積リングのラティス例として、NIJI-Iのレイアウトを用 いた。

このリングの電子軌道上に波動用電磁石 B_V を設置したとして、キックを与えた時の蓄 積ビームの設計軌道からの変位 Z (s)及び傾き角 Z'(s)は(5.2 -2)および(5.2 -3)式を用いて、計算することができる。リングの動作点としては、通常最も入射効率 の高い $\nu_x = 1.37$ 、 $\nu_z = 1.53 \sim 1.57$ が選ばれているが、Q_F、Q_Dの磁場を変えること により、動作点を可変とすることができる。

まず、波動の節が2箇所生じる例として $\nu_z = 1.2$ ($\nu_x = 1.37$)の場合を図5.4 -1に示す。セプタム電磁石が設置されている長直線部の中心をs = 0 mとして、電子の進行 方向に沿ったs = 3.7 mにB $_v$ を置き、1 mradのキックを与えると、電子軌道上のs



図5.4-1 NIJI-Iにおける蓄積ビームの縦波動パターン、s=3.7 m
 に設置した波動用電磁石によりキック角1mradを与えた場合

=0 mとs =7.5 mの点に波動の節が生じる。キック角 ϕ_x は、By の交流励磁電流に比 例し、Z (s)及びZ'(s)は、 ϕ_{κ} に比例するので励磁電流を増せばZ (s)および Z'(s)は増大する。この例より、電子波動法はSRリソグラフィにとって大面積露光を 可能にする非常に有用な方法であることがわかる。しかし、図5.4 -1 より明らかなよう に、偏向電磁石が設けられるビームライン各部で、ZおよびZ'のそれぞれ異なるSR光 が放射され、要求される照射野に対して、利用されるビームライン長が極端にアンバラン ス化するとともに有効に利用できないビームラインも生じる。また、1mradのキック に対して、Z'(s)は 1mrad 程度であるので、Bvの負担も大きくなる。小型電子 波動リングが産業用装置として普及してゆくには、 上に述べた問題点を解消し、 利用に 供しうるビームライン当りの装置コストを低減することが必須となる。そのために重要な のは、ZおよびZ'がベータトロン振動数と波動用電磁石の設置位置によってどのように 変化するかを知ることである。これらにより、Bvの負担が大きくならず、かつすべての ビームラインで同時に大面積露光ができる最適な小型電子波動リングシステムを決定する ことができる。図5.4 -2 は、NIJI-Iのラティスにおいて、ベータトロン振動数 1.5 < ッ < < 2.5 の波動特性を、波動用電磁石の設置位置の関数として得た最適例として 示す。ベータトロン振動数は $\nu_z = 1.8$ 、波動用電磁石の設置位置はs = 4.8 m、キック 角は1 mr a dである。注目すべきことは、各偏向電磁石においてほぼ等しい|Z|、



図 5. 4-2 NIJI-Iにおける蓄積ビームの最適化した縦波動パターン、s=4.8
 mに設置した波動用電磁石によりキック角1mradを与えた場合

| Z' | が実現することである。なぜなら、ウエハー面上で所定の縦照射野に露光するの に必要なビームライン長は 5.3節に示したように、Z(s) とZ'(s) が同符号の場合短 くて済み、異符号の場合、同符号に比して長くせざるを得ない。一方、光源とマスク間の 距離を一定とすれば、異符号の場合の方がより小さい許容垂直ビームサイズが要求される。 従って、長いビームラインの必要な異符号の場合には、 | Z | と | Z' | が各偏向電磁石 で同程度であるとすれば、許容垂直ビームサイズを同符号の場合とほぼ一致させることが できる。このことは、小型電子波動リングのビームラインおよびリソグラフィシステム構 成上、非常に有利となる。

ここで、実用機の電子エネルギーレベル 640MeV を仮定し、プロキシミティギャップを G=15µmとして、半影ぼけを $\delta \leq 0.025\mu$ mとしうるビームサイズを示す。図5.4 -2 の各偏向電磁石でのZおよびZ'を用いて、縦照射野50mmに露光するのに要するビーム ライン長は、B_{1.8.5.7} では約 4m、B_{2.4.6.8} では約 7mとなり、いずれも垂直ビーム サイズは、 $\sigma_{Z} \leq 約1$ mmとなる。また、水平ビームサイズは、約 4mのビームライン長 で決まり $\sigma_{X} \leq 約1$ mmとなる。以上のように、すべての偏向電磁石における | Z | およ び | Z' | を等しくしうる電子波動リングを実現する際の設計指針を以下に示す。

- ① ラティスの周期数Nを偶数に選び、かつ偏向電磁石が 2N組からなるリング構成と する。
- ② 垂直方向ベータトロン振動数 ν_z は、周期数 N に対し、(N-1)/2 < ν_z < (N+1)/2
 (ν_z + N/2)の範囲で選ぶ。
- ③ 偏向電磁石間の直線部の中央に波動の節を生じさせるように、その位置での位相の 進みの制御が容易な垂直方向ベータトロン関数β₂(s)を有するラティス構成とす る。
- ④ 垂直方向ベータトロン関数β_z(s)の選択だけでは、偏向電磁石間の直線部に、波 動の節を生じさせることができない場合は、波動用電磁石の位置の最適化を行う。

以上より小型電子波動リングをX線リソグラフィ光源として適用する場合、各偏向電磁 石における蓄積ビームの変位および傾き角を等しくすると有用なリングシステムとなるこ とがわかった。解像度の点より、ビームサイズの増大をもたらす各種ビーム不安定性の低 減を考慮したリング設計を行うことにより、理想的なX線リソグラフィ光源の実現が期待 できる。 5.4.2 電子波動実験¹⁾

本項では電子波動特性の計算結果と実測結果との比較を目的とし、蓄積ビームに垂直方 向のキックを与え、リングの数箇所のビューイングポート部においてビームの変位および傾 き角を測定した。また電子波動に伴なうビーム安定条件に及ぼす影響の実験結果について も述べる。

(i) 実験装置と方法

波動用電磁石はリングの長直線部 S₂ に設置してあるベータトロン振動数測定のための RF-KO電極部の外側に配置した(図5.4 -3)。その電磁石の最大励磁電流は 2.5A であり、ビーム位置において B_K =50G・mの偏向力を発生できる。リング内のビームの



⊠5. 4-3

電子波動実験時の波動用電磁石の配置

変位Zおよび傾き角Z'はフォトダイオードアレイを設置する位置を変化させて、その上 に作られるビームの位置の変化から調べた。

フォトダイオードアレイ(Hamamatsu S 2311)は、ビームプロファイルモニターに用い ているものと同じである。垂直方向のビームの動きを調べる目的のためには、レンズ系は 不要であるので省略し、図5.4 -4 に示すような構成をとった。SR光の光量を調整する ためピーク波長 439.5 nm、半値幅12 nm、透過率35.5%の干渉フィルターおよびNDフ ィルター 1/2,1/8を組み合わせて用いた。観測波形は図5.4 -5 に一例を示すように、デ ジタルオシロスコープ(YHP 540201A)で測定した。

N I J I – I の動作条件は電子エネルギー 160MeV、蓄積電流~20mA、ベータトロン 振動数 (ν_x, ν_z)=(1.37, 1.57) である。

(ii) 実験結果

図5.4 -6 に波動用電磁石の励磁電流 I_s を 0.4A (キック角 ϕ_{κ} =1.5 m r a d) か



ら 0.9A (ϕ_{κ} =3.4 m r a d) に変化させた時の偏向電磁石 B₁ における垂直方向ビー ムプロファイルの中心の変位を示す。フォトダイオードアレイを光源から1.46mの位置に 設置した場合である。ビームの変位は波動用電磁石の励磁電流にほぼ完全に比例してい る。

図5.4 -7 に I_s = 0.9Aの時の偏向電磁石 B₁. B₂. B₄ のビューイングポート部で測 定したビーム変位の光源とフォトダイオードアレイ間の距離の依存性を示す。その他 B₃ にはビューイングポートが取り付けられておらず、B₅, B₆ およびB₇ にはビーム特性を 測定するための計測系が設置されているので観測を行わなかった。この図から蓄積ビーム のリング内での波動特性が求められる。計算結果(図5.4 -8)から得られた蓄積ビーム の変位、傾き角は実線で示してある。両者は極めてよい一致をみた。結果として電子波動



図 5.4-7 蓄積ビーム変位の光源-フォト ダイオードアレイ間距離依存性、 実験結果と計算結果の比較



図5.4-8 波動用電磁石により ϕ_{κ} =3.4 mrad (I_s =0.9 A) を与えた場合の計算結果

特性の計算の妥当性が確認できた。

また、(5.2 -2)式は偏向電磁石部でのベータトロン関数 β の測定にも使える。すな わち、各偏向電磁石同志の磁場調整に用いられる補正コイルの電流を変化させ蓄積ビーム にキック角 ϕ_{κ} を与えた場合、ベータトロン振動数 $\nu_{x,z}$ が既知であると、s₁のところ でのビーム変位X_{x,z}を測定すると

$$\beta_{X, Z}(\mathbf{s}_{1}) = \frac{2X_{X, Z}(\mathbf{s}_{1}) \tan \pi \nu_{X, Z}}{\phi_{\kappa}}$$
(5.4-1)

となり β_{x, z} を決めることができる。

(iii)電子波動の蓄積ビームへの影響

NIJI-Iには、蓄積ビームに収束力を作っている4極電磁石、n値およびエッジ角 を有する偏向電磁石があるが、通常生じる製作誤差あるいは据付け誤差の範囲内でもこれ らの磁石が電子波動を与えることにより、チューンシフトが大きくなれば蓄積ビームの運 動を不安定にするチューン(共鳴)を電子がとることになり、ビームが不安定になるばか りか、ベータトロン関数も大きく歪むことになる。そこで電子蓄積ビームの安定条件が乱 されることはないかを確かめることにした。実際的な適用を考えて波動用電磁石に-0.9 A~0.9 Aの励磁電流を流し、水平方向および垂直方向のチューンシフト△νx.z を測定 した。結果を図5.4 -9 に示す。励磁電流を(-)とした場合の方が若干シフト量の大き い傾向が認められるが、電子波動に伴う動作点の変化はほとんどないことを示している。 また同時に測定した蓄積電流減衰率から蓄積ビーム寿命への影響もないことが明らかとな った。要するに、電子波動法の実用的価値はきわめて大きいことが判明した。



⊠5. 4-9

波動用電磁石の励磁電流を 変化させた場合のベータト ロン振動数のシフト量 5.5 むすび

小型電子蓄積リングからのSR光をリソグラフィに用いる上で、解決すべき課題の一つ である大面積露光を実現するため、電子波動法の適用を検討し考察を加えた。

また、電子波動法による蓄積ビームの波動特性を考慮した許容しうるビームサイズを明 らかにした。

これらの結果を要約すれば、次のとおりである。

- 一個の波動用電磁石を用いて、リングの中の蓄積ビームに縦波動を起こさせた場合の 計算結果と実験結果を対応させた。蓄積ビームの変位および傾き角とのいずれにおい ても一致が極めて良いことが判明し、この計算を用いて電子法動リングの設計をすれ ばよいことがわかった。
- 2)上記の計算により、すべてのビームラインで同時に露光領域の拡大が可能である最適な電子波動リングを構成しうることを初めて明らかにした。最適化を図るには、各偏向電磁石における蓄積ビームの変位および傾き角の絶対値を等しくすることがポイントである。このためには、垂直方向ベータトロン振動数の選択、直線部で位相の進みの制御が容易なラティスおよび波動用電磁石の設置位置の選択が必要であることを示した。
- 3)電子波動の蓄積ビームに与える影響について検討した。その結果、蓄積ビームに実際 に適用する場合の値に相当する± 5~6 mmの変位を生じさせてもチューンシフトは 極めて小さく、ビームの安定条件を乱すことはないことを確認した。
- 4)電子波動法を適用した際の許容しうるビームサイズは、光源とマスク間の距離、プロ キシミテイギャップおよび波動位相などの関係によって決まるが、NIJI-Iの波 動特性を最適化した場合を例にとり検討した結果、電子波動による解像度の低下は事 実上問題にならないことを明らかにした。

以上の諸検討により、電子波動法は、大面積露光ができる実用的な技術であることが証 明された。この成果は、今後のSRリソグラフイの露光システム設計に生かされ、その効 力を十分に発揮できるものと期待される。
参考文献

5.1節

- 1) R. P. Haelbich et. al., J. Vac. Sci. Technol. B1, 1262 (1983).
- 2) M. Bieber et. al., ibid, Bl, 1271 (1983).
- 3) F. Cerrina et. al., ibid, BI, 227 (1985).
- 4) 第2章 2.4 節の文献 6).
- 5) H. Betz and G. Mülhaupt, Proc. SPIE 448, 83 (1983).
- 6) T. Tomimasu et. al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-32, 5, 3403 (1985).
- 7) H. Tanino et. al., Jpn. J. Appl. Phys. 22, L677 (1983).
- 8) 高田•冨増、電学論 C, 108, 8 (1988).

5.2節

- 1) T. Tomimasu, Jpn. J. Appl. Phys. 26, 5, 741 (1987).
- 2) M. Sands, SLAC-121, DUC-28, 49 (1970).
- 5.3節
 - 1) 第2章 2.1節の文献 7).
- 5.4節
 - 1) 筒井•岡崎•高田, S63年春季応物講演会, 31P-H-15 (1988).

第6章 結 論

産業用SR光源の開発において、電子入射器の小型化に寄与する低エネルギー蓄積ビ ームの寿命を決める要因の解明およびその高効率入射技術の開発は、電子蓄積リングの 小型化のための超電導偏向電磁石の開発と並ぶ大きな柱である。著者は世界で初めて低 エネルギー入射研究用の小型電子蓄積リングNIJI-Iを建設し、一貫してその研究 を行ってきた。実用機完成一番乗りを目指した各国の熾烈な開発競争に熱いまなざしが 注がれている。著者もそれと歩調を合わせるべく超電導小型電子蓄積リングを開発中で ある。

本論文は、主として低エネルギー入射による大電流蓄積に関する基礎的研究について まとめた。入射エネルギーはほぼ80~160Me V であり、蓄積ビーム寿命を決めるTouschek 効果だけでなく、イオントラッピング効果およびビーム不安定性に起因する現象の多岐 に亘り、これらに関する基礎データを蓄積した。それと並行して、実用機に反映しう るようにリング各構成要素の基礎特性の把握、大面積露光のための電子波動特性に関す る検討ならびに低エネルギー蓄積ビーム診断法の検討と開発を行った。

本研究の結果を総括すると以下のようになる。

第2章

- (1)小型SR光源のX線リソグラフィへの適用について検討し、リングパラメータを 明らかにした。特に、低エネルギー入射により達成すべき蓄積電流の目標を示した。
- (2)電子蓄積リングの小型化のためには、偏向電磁石に収束力を持たせた弱収れん方 式が有用であり、またTouschek寿命の点からも有利であることを示した。この方式 指針に基づき、小型電子蓄積リングNIJI-Iを開発した。
- (3)光ファイバ磁界センサをリング入射系のキッカー電磁石のパルス磁場測定に初め て応用し、時間分解能および空間分解能に優れた磁場計測技術を開発した。
- (4) rf加速空胴を製作し、その特性試験を行った。共振周波数、Q値、シャントイン ピーダンスについて3次元的影響までを含めた設計マージンの見込み範囲を明らか にした。実用機のための大電力用のrf加速空胴の設計、製作に対する見通しを得る ことができた。
- (5)リングの真空系ならびにトランスポート系について検討し、実用機に反映すべき 事柄を示した。

第3章

(1) SR光の蓄積ビーム診断への適用について検討し、この適用がリングの直線部分 の短縮ならびに電磁誘導による誤差をなくする面からも有用であることを明らかに

し、蓄積ビーム診断の適用範囲および精度を示した。

- (2)高量子効率、広波長域のシリコンフォトダイオードを利用した蓄積電流計測装置 を試作し、低エネルギー電子からのSR光でも約±1.2%精度で蓄積電流が計測で きることを実証した。
- (3)広帯域で高感度な特性を有するDC-CTを開発した。しかし、偏向電磁石の洩れ磁場の影響を受け、零点の校正が必要であることが明らかとなった。電子エネル ギーを上昇させるときには、予め校正カーブをとっておき、オフセットをそのカー ブより求めることが必要であることがわかった。
- (4) 蓄積ビームの位置を観測するのに有用な4極ボタン型モニターを開発した。この モニターにより閉軌道のずれを修正し、蓄積電流の増大が図れた。
- 第4章
- (1)蓄積ビーム内にトラップされるイオンは、電子エネルギーの増加に伴うSR光に よるガス放出とともに増加することを発見し、イオンを除去する手段(dcクリアリ ング)を講じ、低エネルギーでは容易にイオンの効果を軽減できることわかった。
- (2)低エネルギーのTouschek寿命の評価は、多重散乱効果だけでなく縦方向バンチ結 合不安定性によるビームサイズ増大を考慮に入れるべきことを示す実験事実を見い 出し、その事実に基づいた寿命算定には Bruckの式が適用できることを明らかにし た。
- (3)低エネルギーの大電流領域で生じる蓄積ビームの速い減衰は、ベータトロン振動 を励起することにより抑制でき、蓄積ビームの寿命が向上することを初めて実験的 に示した。
- (4)低エネルギー電子の電流蓄積速度を決定する要因である入射頻度上昇の効果を実験的に測定した。ベータトロン振動の放射減衰時間は制約条件とはならずキッカー 電磁石のキック角および入射頻度の最適化により高い電流蓄積速度が得られることを明らかにした。
- (5)低エネルギー入射により大電流蓄積を成し遂げるための課題はほぼ解決できた。 80MeV未満の電子エネルギーでの入射は行えなかったが、更に低エネルギー入射の

可能性のあることを示した。低エネルギー蓄積ビームの診断に有用なSR光を用い

ることのできる50MeV程度が実用的な入射エネルギーレベルであると言える。

第5章

- (1)電子蓄積リング中のビームに縦波動を起こさせて照射野の拡大をはかる電子波動 法に関して、蓄積ビームの変位および傾き角は計算結果と良く一致することを初め て実験的に示した。
- (2)波動用電磁石一個を用いる小型電子波動リングでは、各偏向電磁石における蓄積
 ビームの変位および傾き角を等しくすると同時照射が効果的に行われることを明らかにした。

以上の小型電子蓄積リングの開発、低エネルギー入射蓄積実験に関する基礎データは、 製造ラインに組み込める規模でかつ経済性に優れた小型SR光源の実現を目指した今後 の超電導小型電子蓄積リングの研究開発に大いに貢献するものと考えられる。

このような光源が完成した暁には、リソグラフィ光源としてだけではなく一般的測定 機器、プロセシング用装置におけるSR光の利用や応用に新たな局面を拓くものと期待 される。

謝 辞

本論文を結ぶにあたり、特別の御指導と御鞭撻を賜りました大阪大学大学院工学研究科 電磁エネルギー工学専攻 中井貞雄教授、渡辺健二教授、同学核物理研究センター長 池上栄 胤教授に深厚なる謝意を表します。

さらに、本論文につき懇切なる御検討を戴いた同学 石村勉教授、三間圀興教授、横山昌 弘教授、三宅正宣教授、井澤靖和教授、権田俊一教授に厚く御礼申し上げます。

終始変わらぬ御指導、御助言、激励を戴いた静岡大学工学部電気工学科 染谷太郎教授に 感謝致します。

本研究は、筆者が住友電気工業株式会社において、電子技術総合研究所の技術指導なら びに官民連帯共同研究のもとで行ったものであり、同所量子放射部長 冨増多喜夫博士の懇 篤なる御指導、御鞭撻を賜り、ここにその成果を論文としてまとめ上げることができまし たこと並びに、その研究内容の発表を許可された同社に対し衷心より感謝の意を表します。

また本研究を通じて常に御助言、御指導、御教示を戴きました電子技術総合研究所量子 放射部放射線技術研究室 山崎鉄夫室長、杉山卓主任研究官、野口勉主任研究官、三角智久 主任研究官に謝意を表します。

本研究の遂行に関し、御指導、御鞭撻ならびに多大の御援助を賜った現 トヨクニ電線株 式会社 吉田泰久専務、住友電気工業株式会社 中原恒雄副社長、小島啓示常務、長崎昌司支 配人また研究指針を与えられるとともに、始終一貫して研究推進面で御相談に預かった研 究開発本部 松村滋副本部長、川島眞生副本部長、大阪研究所 三井勉所長、古川晃平部長に 対し深謝の意を表します。

最後に研究生活の苦楽を共にし、熱心な討論と協力を戴いた筒井康充氏、三浦藤雄氏、 宇佐見浩氏、向井英仁氏、岡良雄氏、岡崎徹氏ほかエネルギー応用機器グループの方々に 深く感謝致します。 発表論文

(主要論文)

- Application of Fiber-Optic Magnetic Field Sensor to Kicker Magnet,
 H. Takada, S. Miyamoto, T. Mitsui and T. Tomimasu, J. Phys. E 21, 4, P. 371 (1988).
- Development of a Compact Synchrotron Radiation System for X-ray Lithography,
 H. Takada, K. Furukawa and T. Tomimasu, Opt. Eng., 27, 7, 550 (1988).
- 3) 小形電子波動リングの開発,高田博史,冨増多喜夫,電学論 C,108,8,(1988).
 P.547.
- 4) High Beam Current Storage at Low Energy for Compact Synchrotron Radiation Ring, H. Takada, Y. Tsutsui, S. Sugiyama and T. Tomimasu, (to be published in Rev. Sci. Instrum., Apr-May 1989)
- 5) Investigation of Low Eneygy Injection with a Compact Electron Storage Ring, H. Takada, Y. Tsutsui, K. Furukawa, T. Tomimasu and S. Sugiyama, submitted to Rev. Sci. Instrum.
- 6) Injection Repetition Rate Effect of Low Energy Electrons into a Compact Storage Ring, H. Takada, Y. Tsutsui and T. Tomimasu, submitted to Jpn. J. Appl. Phys. (その他の論文)
- Development of Compact Synchrotron Radiation Ring for X-ray Lithography,
 H. Takada, K. Furukawa and T. Tomimasu, Proc. SPIE, 773, 257 (1987).
- 2) Compact Storage Ring "NIJI-1", T. Tomimasu, S. Sugiyama, T. Noguchi, T. Yamazaki,
 T. Mikado, M. Chiwaki, T. Nakamura, Y. Yoshida, T. Mitsui, K. Furukawa, H. Takada,
 Y. Tsutsui, H. Mukai and F. Miura, TELL-TERAS Activity Report 1980 ~1986,
 Electrotechnical Laboratory, P. 57 (1987).

-176-

- 3) A 158MHz RF Accelerating System for Compact Electron Storage Ring "NIJI-1", H. Takada, Y. Tsutsui and T. Tomimasu, Proc, 6th Symp. on Acc. Sci. and Tech. (INS, Tokyo, 1987) P135.
- 4) Compact Electron Storage Ring "NIJI-1", T. Tomimasu, S. Sugiyama, T. Noguchi, T. Yamazaki, T. Mikado, M. Kimura, M. Chiwaki, T. Nakamura, Y. Yoshida, T. Mitsui, K. Furukawa, H. Takada, Y. Tsutsui, H. Mukai and F. Miura, Proc. 6th Symp. on Acc. Sci. and Tech. (INS, Tokyo, 1987) P. 53.
- 5) Recent Status of Compact Electron Storage Ring "NIJI-1", T. Tomimasu, S. Sugiyama, T. Noguchi, T. Yamazaki, T. Mikado, K. Furukawa, H. Takada and Y. Tsutsui, Proc. 3rd Japan-China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications (RIKEN, WAKO, SAITAMA 351-01, Japan Nov. 1987).
- 6) 小型SR装置の開発, 富増多喜夫, 杉山卓, 古川晃平, 高田博史, 筒井康充, 住友 電気, 第131号(1987) P.114.
- 7) Development of Compact Synchrotron Radiation System, H. Takada and
 K. Furukawa, Denshi Tokyo, 26, 67 (1988).
- 8) Development of Compact SR System, T. Tomimasu, S. Sugiyama, K. Furukawa, H. Takada and Y. Tsutsui, Sumitomo Electric Technical Review, No. 27 (1988) P. 145.

-177-

国内学会発表

- 1987.3
 小型テストリングNIJI-1
 早稲田大学
 応用物理学会

 のイオントラッピング現象
- 1987.3
 電子蓄積リング(虹1号)にお
 早稲田大学
 応用物理学会

 ける蓄積電子寿命に関する検討
- 1987.10
 小型SOR開発の現状
 名古屋大学
 応用物理学会

 「シンポジウム, X線源とその応用」
- 1987.11 小型SR装置の開発とその応用 大阪府立大学 電気関係関西支部 「シンポジウム, X線放射エ ネルギー技術とその産業応 用」
- 1988.3
 小型電子蓄積リングにおける電
 法政大学
 応用物理学会

 子波動の検討

付 録

産業用小型SR光源

産業用小型SR光源として稼働、開発中もしくは提案されているものについて、著者の知るかぎりを取りまとめ表に示す。

国 名		リング名	偏	向 1	重 磁	玄 石	電子エ	ネルギー	
	研究機関		常電導		超電導		入射蓄積		状 況
			Bmax、 (T)	ρ、個 (m) 数	Bmax (T)	、o、個 (m)数	Ei (MeV)	Emax (MeV)	
E	電総研	NIJI-I	1.2	0.7 8			80-160	230	稼働
本	住友電工	N I J I – П N I J I – Ш	1.43	1.4 4	4.1	0.5 4		600 615	(1986.2) 開発中 開発中
	SORTEC	(分)	1.2	2.78 8			1000	1000	開発中
	ΝΤΤ	(NTT-I)	1.5	1.85 8			15	800	稼働
		(NTT- II)			3.5	0.524 2	15-550	550	(1988.1) 開発中
	住友重機	AURORA			4.34	0.5 1	150	650	開発中
	石川島播磨	LUNA	1.33	2.0 4			45	800	開発中
	東大物性研				4.0	0.83 2	100	1000	設 計
	高エネ研 古河電工				1.7	1.96 6	1000	1000	設 計
西 独	BESSY	COSY- I COSY- П			5.0 4.47	0.38 1 0.44 2	0.1 50	560 592	開発中止 開発中
	カールスルーエ 原子核研				4.0	1.2 4	150	1400	開発中
	ミュンヘン 工科大	klein ERNA			5.0	0.291	8	430	設 計
米 国	ブルックヘブン 国立研		1.6	2.25 8	3, 5	0.692	1000 100	1000 728	開発中? 開発中
	IBM		1.8	1.85 6			100	1000	設計
	ブロベック ローレンスバークレー 研		2.0 -2.2	1.6 12			25-50	1000	設 計

国名	研究機関	リング名	偏向電	፪ 磁 石	電子エネルギー	
			常電導	超電導	入射蓄積	状 況
			Bmax、ρ、個 (T) (m) 数	Bmax、 o 、個 (T) (m)数	Ei Emax (MeV) (MeV)	
仏	ネーピック	MARS	1.7 1.57 4		10 800	設計
国	パリ大学			4.75 0.3 1	10 432	設計
英国	オックスフォード インスツルメント	HELIOS		4.5 0.519 2	200 700	開発中
ג <u>ל</u> ג	-デン スカンジトロニクス			4.0 0.57 2	680 680	設計

注)シンクロトロンモードで加速蓄積するタイプのリングである。超電導電子蓄積リン グ(NTT-II)への電子入射器として低エネルギー入射研究用に用いることがで きる。