

第1章 はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究所 (JAERI) の共同プロジェクトである大強度陽子加速器計画 (別名統合計画) 施設の建設が平成13年度から6年計画でスタートした。本施設が完成し設計通りの性能が達成されることによって、世界最大出力の陽子ビームを実験施設に供給することができることになる。本計画は、2つの研究所で独立に考えられていた計画を、2つの研究所の協力のもとに1つの計画として統合したものとなっている。この章では各研究所で独立に検討されていた計画の内容と本計画の構成を簡単に述べることにする。

1-1 大型ハドロン計画

旧東京大学原子核研究所とKEKが中心になって検討されていた計画である (Japanese Hadron Project, JHF)。当初検討されていた加速器は、1GeV陽子リニアック+ストレージリングという構成であった。しかしKEK 12GeV陽子シンクロトロンユーザーからのビーム増強要求と、1993年にカナダのTRIUMFが中心となって推し進めていたKAON計画の中止が決定されたのを期に、新しい大強度ハドロン加速器の建設への期待が高まった。この要望に答える形で、JHFは陽子リニアック+ラピッドサイクルシンクロトロン (RCS) +メインリング (MR) という3つの加速器からなる構成に形を変えた。陽子リニアックの加速エネルギーは200MeVであ

る。RCSの加速繰り返しは25Hzで加速エネルギーは3GeV、平均電流は200 μ A、ビーム出力は0.6MWである。3GeVビームは、N-アレーナ (中性子)、M-アレーナ (ミューオン)、E-アレーナ (不安定核) に供給される。RCSからのビームの一部はMRに入射され、50GeVまで加速される。MRの平均電流は10 μ A、出力は0.5MWである。MRで加速されたビームは、K-アレーナ (Kaon+その他)、ニュートリノ振動実験のために利用される計画であった。この施設全体はトリスタンリングの内側に置かれ、3GeVリングは12GeV陽子リングトンネルを再利用する計画であった。

1-2 中性子科学計画

JAERIによって提案された計画。核破砕中性子を利用する施設と、原子炉から発生する長寿命の放射能を持った廃棄物を加速されたビームを使って単寿命なものに変換する研究を行う施設からなる。加速器は、超伝導空洞による加速を中心にした加速エネルギー1.5GeVの陽子リニアックとコンプレッサーリングから構成される。第一段階として、ビーム出力は1.5MW (平均電流1mA)、次の段階としてイオン源でビーム強度増強を行い、またリニアックを連続運転 (CW) することにより最終的に出力を8MWまで増やす計画であった。1.5GeVリニアックによって加速されたビームは、核変換を研究する施設、中性子物理施設、核破砕生成物を加速する施設等に供給され、コンプレッサーリングによって単パルス化されたビームは中性子散乱施設に供給される計画であった。

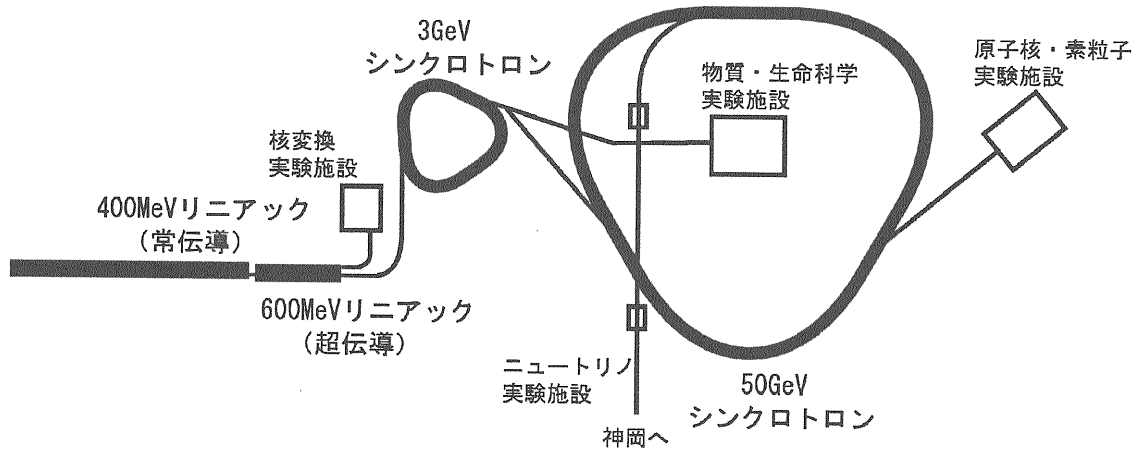


図1 大強度陽子加速器施設のレイアウト

表1 大強度陽子加速器計画各実験施設へ供給されるビームのパラメーター

実験施設	エネルギー (GeV)	平均電流 (μ A)	ビームパワー (MW)	パルス長 (μ s)	繰り返し (Hz)
核変換	0.6	333	0.2	500	25
物質・生命	3	333	1	1	25
原子核・素粒子	50	15	0.75	0.7×10^6	0.3
ニュートリノ	50	15	0.75	5	0.3

1-3 大強度陽子加速器施設の構成

上で述べた両組織の独立した計画を比較すると、施設構成や研究目的に似通った部分がかかなりあることがわかる。また両計画とも巨額の前算を必要とするため、前算を有効に利用するという意味でも、この2つの計画を両機関の共同プロジェクトとして統合するという考え方は納得しやすいものと言うことができるであろう。大強度陽子加速器施設は日本原子力研究所東海研究所南地区に建設されることになった。

本計画の加速器は

- 400MeV 常伝導リニアック
- 600MeV 超伝導リニアック
- 3GeV ラピッドサイクルシンクロトロン (3GeVPS)
- 50GeV シンクロトロン (50GeVPS)

から構成されている。各加速器の説明は次章で行うこととし、ここでは加速ビームを利用する実験施設について簡単に述べることにする。

物質・生命科学実験施設

3GeVPSからの高出力ビームで駆動される核破碎パルス中性子及び高強度なミュオンビームを用いて、物質科学、生命科学、材料化学などの研究を行う。3GeVPSからのマイクロ秒オーダーの短パルスビームは、飛行時間法によって中性子エネルギーの測定を可能にするという大きな利点をもつ。あるパルス中の低エネルギー中性子と次のパルス中の高速中性子を区別するために、次のパルスがやってくるまでの時間はある程度長い必要がある。この点で、3GeVPSの25Hzの繰り返し(40msおき)は適当なものといえる。

核変換実験施設

原子力発電所で発生する高レベル廃棄物中の長

寿命核種を、大強度陽子ビームによって生成される高速中性子を利用して、短寿命核種に変換する(ADS)ための基礎研究をする施設である。核変換実験施設は工学と物理実験施設の2つから構成される。工学実験施設は、600MeV超伝導リニアックで加速された200kWのビームを用いて、ADSで使用する構造材料の照射試験を行う。物理実験施設では600MeV、10W程度のビームを用いて、ADSにおける中性子挙動等の物理的特性の研究を行う。

原子核・素粒子実験施設

50GeVPSからの陽子ビーム、または陽子ビームによって生成されるK中間子などの2次粒子を利用して、原子核、素粒子の研究を行うための施設である。50GeVPSからの繰り返しで0.3Hzで0.7秒かかってゆっくりとリングから取り出される平均電流15 μ A、750kWのビームを利用する。この非常に長いビームパルスは、カウンター実験でアクシデンタルコインシデンスを避けるために有効である。またビームはデバンチした状態でリングから取り出される。

ニュートリノ実験施設

ニュートリノ振動実験を行う施設である。50GeVPSから取り出された数マイクロ秒のパルス幅を持った平均電流15 μ Aの陽子ビームを標的に衝突させることによってパイ中間子を発生させ、その崩壊の結果生じるニュートリノを東海敷地から約300km西に位置する「スーパーカミオカンデ」に打ちこむ。

図1は大強度陽子加速器施設全体のレイアウトである。表1で各施設に供給されるビームのパラメーターをまとめてみた。

第2章 大強度陽子加速器の概説

2-1 加速器の構成

2-1-1 リニアック

(1) イオン源

負水素イオンを生成、引き出すために、体積生成型というイオン源が使われる。このイオン源は、高強度でしかもエミッタンスが小さいビームが得られるのが特徴である。少量のセシウム蒸気を使用することによって、ビーム強度を増加させることができるが、セシウム蒸気が下流に置かれているRFQの電極に付着すると放電を誘発する可能性がある。

(2) RFQ

イオン源から出てきたエネルギー50keVのビームは2つの収束用ソレノイドコイルを通して、RFQ(Radio-Frequency Quadrupole Linear Acceleratorの略)に入射される。RFQは4つのベインと呼ばれる電極をもち、電極間に高周波電場を発生させる。ベインには凹凸がつけられ、これが進行方向の高周波電場を発生させ、ビームをバンチし加速することができる。大強度陽子加速器のRFQは4ベイン型で共振周波数が324MHz、加速エネルギーは世界最高の3MeVである。この4ベイン型RFQには、KEKで開発された電場分布を安定化するための「 π モード安定化ループ」が取り付けられている。

(3) リバンチャーとチョッパー

RFQとDTLの間のビーム輸送系には、RFQからのビームをDTLに入射するためのリバンチャー2台とビームチョッパー(後述)が置かれる。

(4) DTL

RFQからのエネルギー3MeVのビームは、DTL(Drift Tube Linac)によって50MeVまで加速される。DTLは多数の筒(DT)が1方向から支持されたアルバレ型で、筒と筒の間に発生する高周波電場でビームが加速される。ドリフトチューブの中には、横方向収束用の四重極マグネットが仕込まれている。四重極マグネットのコイルはKEKで開発されたものが採用される。このマグネットの発熱を抑えるために、この電流はDTLの運転に応じてパルス励磁される。DTL

の共振周波数は324MHz、空洞数は3台、全長は約27mである。

(5) SDTL

SDTLはSeparated type DTLの略で、加速と横方向収束の機能を分離したDTLである。具体的に言うと、四重極磁石をドリフトチューブの中に入れて、空洞と空洞の間に設置する。このことにより、ドリフトチューブのサイズを小さくすることができるため、空洞の加速効率(シャントインピーダンス)を向上させることができる。このSDTLで50MeVから191MeVまで加速する。1空洞あたりのセル数は5で空洞間には1セットの2連4重極電磁石が置かれる。空洞数は32台で全長は91である。1台のクライストロンからの高周波電力は結合器を通して2つの空洞に分配される。

(6) ACSリニアック

191MeVから400MeVまでの加速に使われる。ACSはAnnular-Coupled Structureの略で、 $\pi/2$ モード結合型空洞に軸対称性を持たせた構造をもっている。ACSの基本構造はKEKで以前開発されたものと同じであるが、周波数は前段リニアックの3倍である972MHzに選ばれている。1系統のクライストロンからの高周波電力は結合器を通して2台のACSタンクに供給される。タンク数は46台である。全長は108mである。

(7) 超伝導リニアック

核変換施設へビームを供給するための600MeVまでの加速には、超伝導リニアック(SCC)が使われる。超伝導リニアックではビーム口径を大きくできるので、ビームロスを低くおさえることができる。また高加速勾配が得られるためリニアックの全長を短くすることができる。陽子リニアックでは、ビームの速度が変化するため空洞はビームの速度に応じていくつかのタイプに分けられる。

リニアックの基本パラメーターをまとめると表2になる。

表2 リニアックの主なパラメーター

<u>イオン源</u>	
イオン	H ⁻
タイプ	体積生成型
引き出し電圧	50kV
<u>RFQ</u>	
タイプ	4ベイン
入射エネルギー	50kV
加速エネルギー	3MeV

共振周波数	324MHz
タンク数	1

DTL

タイプ	アルバレ
入射エネルギー	3MeV
加速エネルギー	50MeV
共振周波数	324MHz
タンク数	3
全長	27m

SDTL

タイプ	アルバレ
入射エネルギー	50MeV
加速エネルギー	191MeV
共振周波数	324MHz
タンク数	32
全長	91m

ACS

入射エネルギー	191MeV
加速エネルギー	400MeV
共振周波数	972MHz
タンク数	46
全長	108m

SCC

タイプ	超伝導
1タンクあたりのセル数	7
1クライオモジュールあたりのタンク数	2
クライオモジュール数	21
入射エネルギー	400MeV
加速エネルギー	600MeV

リバンチャー

設置場所	RFQ-DTL
周波数	324MHz
台数	2

デバンチャー

設置場所	ACS下流
周波数	324MHz
台数	2
共振周波数	972MHz
横方向収束	Intercryomodule Q-doublet
全長	110m

チョップパー

設置場所	RFQ-DTL
周波数	324MHz

2-1-2 リニアック-3GeVPS ビーム輸送系

ACSの後には25Hzのパルス偏向電磁石が置かれ、SCCに行くラインと3GeVPSに行くラインに振り分けられる。また3GeVPSへのビームの運動量の広がり小さくするためのデバンチャーが置かれる。3GeVに行くラインはL3BTといわれ、3GeVリング入射点に向うた

めの90度アーク部がある。アーク部には、リニアックからのビームを捨てるためのダンプやエネルギーのテイルを取り除くためのコリメーターが置かれる。その下流には、ビームの横方向のテイルを取り除くためのスクレーパー（フォイル）が複数箇所置かれる。

2-1-3 3GeVPS

リニアックからの400MeVのH⁻ビームは、25Hzという早い繰り返しのシンクロトロンで3GeVまで加速される。3GeVPSの直線部にはそれぞれ入射装置、加速空洞、ビームのテイルを取り除くためのコリメーターが置かれる。

3GeVPSへやってきたH⁻ビームはリングの入射点に置かれた荷電変換フォイルを通過し、H⁺となりリングを周回する(H⁻荷電変換入射)。リングの横方向位相空間を一杯に満たすために、バンパマグネットによって少しずつ軌道を変化させながらビームをリングに蓄積する(ペインティング)。ビームが入射している時間は約500μsである。偏向電磁石と複数台の四極電磁石は、共振を利用した電源によって、直流分が加わった正弦波で励磁される。複数組みの電磁石が独立の共振電源で励磁されるので、お互いの正弦波励磁電流の誤差(トラッキングエラー)を許容範囲に抑えることが重要な課題となる。

3GeVリングの繰り返しは25Hzと高速であるため、偏向電磁石や四極磁石で発生する磁場の時間変化が大きい。これらの部分に金属製の真空チェンバーを使用すると渦電流による発熱と磁場の乱れが問題となる。従って3GeVPSでは、セラミックチェンバーが使われる。セラミックチェンバーにはビームによる高周波電流を遮蔽するための金属シールドが施される。

高周波加速には、KEKで開発された高加速勾配の金属磁性体空洞が使われる。空洞数10台で、加速に必要な420kVの電圧を発生させることができる。空洞1台あたりの加速勾配は26kV/mである。

3GeVPSからのビームを取り出すためには、早い取りだし法が使われる。これはキッカー電磁石によって次のバンチがやってくるまでの短い時間で高速に磁場を立ちあげ、ビームを周回ビーム領域より外側に蹴り出す。そしてセプタム

表3 3 Ge V P Sの主なパラメーター

入射エネルギー	0.4 GeV
最大加速エネルギー	3 GeV
周長	313.5 m
加速繰り返し	40 ms
加速パターン	正弦波
ハーモニック数	2
バンチ数	2
R F周波数	1.36-1.86 MHz
加速時間	20 ms
加速電圧	420 kV
入射方式	H 入射 (水平、垂直方向ペインティング)
取り出し方式	早い取りだし

表4 50 Ge V P Sの主なパラメーター

入射エネルギー	3 GeV
最大加速エネルギー	50 GeV
周長	1567.5 m
加速繰り返し	3.27 s
加速パターン	台形波
ハーモニック数	10
バンチ数	8
R F周波数	1.86-1.91 MHz
加速時間	1.9 s
加速電圧	280 kV
入射方式	bunch to bucket
取り出し方式	遅い取り出し 早い取り出し

電磁石と呼ばれる電磁石で最終的にビームをリングから取り出す。

3 Ge V P Sの基本パラメーターを表3で示す。

2-1-4 3 Ge V - 50 Ge V P S間のビーム輸送系

3 Ge V P Sから取り出されたビームは25 Hzのパルス偏向電磁石で、50 Ge V P Sと物質・生命科学実験施設へのラインに振り分けられる。50 Ge V P Sへのビームラインは3-50 BTと言われる。パルス電磁石の下流には、ビームのx・y方向のテイルを削るためのコリメーターセクションが置かれる。このセクションでは収束周期あたりのベータートロン振動の位相の進みは120度と強くなっている。その下流でビームは50 Ge V P Sのレベルに合わせるために約4m下側に下げられる。50 Ge V P Sと同じビームレベルになった後50 Ge Vリングに接続される。3-50 BTの全長はおおよそ200mである。

2-1-5 50 Ge V P S

50 Ge V P Sは、3回対称性をもつおむすび型のリングであり、3つの曲線部と3つの長い直線部から構成される。

このリングでは、ディスパージョンが負の領域をつくることによって、加速の途中で、ビーム方向の位相安定性がなくなる領域を通過しないようなラティス構造が採用されている(イマジナリー γ_4 ラティス)。50 Ge Vリングは約120mの3つの直線部を持つ。1つ目の直線部には、入射機器、入射エネルギー用アポート機器、そしてビームコリメーターが置かれる。50 Ge Vリングへの入射は1ターン入射法が使われる。これは早い取りだし法の逆過程であり、まずリングにやってきたビームはセプタム電磁石で周回軌道の端付近まで寄せられ、その後には置かれたキッカー電磁石でリング軌道に重ねられる。

2つ目の直線部は遅い取りだし機器が置かれる。遅い取りだし機器は、4台のバンプマグネット、静電セプタム、セプタム電磁石からなる。共鳴を励起するための非線型磁石は他の直線部に置かれる。取りだし時間は0.7秒である。遅い取りだしによってリングから取り出されたビームは、原子核・素粒子実験施設に供給される。

3つ目の直線部には、加速空洞と早い取りだし機器が置かれる。この直線部を通してリングから取り出されたビームは、ニュートリノ実験施設に供給される。またこの直線部の取りだし軌道下流には、加速ビームを捨てるためのダンプが置かれる。

加速空洞は3 Ge V P Sと同じ高加速勾配の空

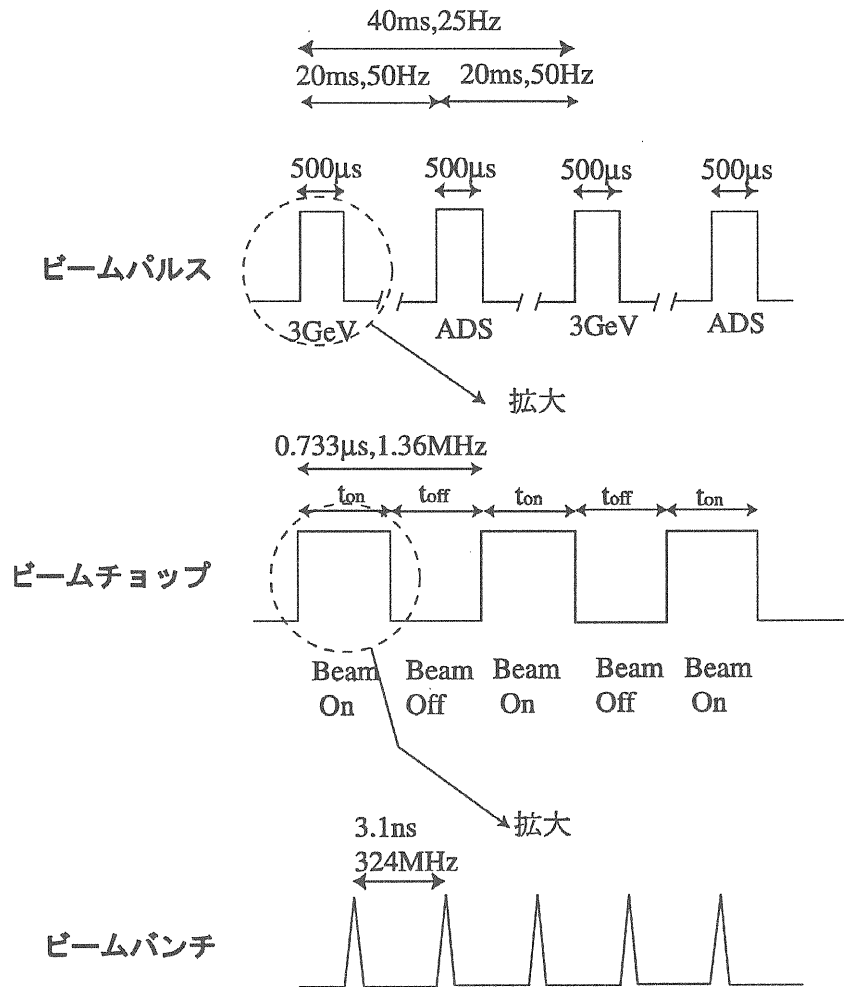


図2 リニアックビームの時間構造

洞が使われる。3GeVビームを50GeVまで1.9秒で加速するために、6台の空洞で280kVの電圧を発生させる。

50GeVエネルギーに対応する偏向電磁石の磁場は1.9Tと高く磁場が飽和している領域での運転となる。50GeVリングの加速繰り返しは0.3Hzである。偏向電磁石、四重極電磁石等は、IGBT素子を用いた力率制御型パターン電源で励磁されるため、無効電力がほとんど発生しない。またこの電源ではリップルを極めて小さくできるのが特徴である。また50GeV運転の際には、電力ライン変動を抑えるためにフライホイール蓄電器を使う予定である。

50GeVPSの基本パラメーターを表4で示す。

2-2 時間構造とビーム強度

ここでは、ビームの時間構造とビーム強度が各加速器でどのようになっているかを説明する。

2-1-1 リニアック

イオン源からでてくる負水素イオンビームのエネルギーは50keVでパルス状に引き出される。このパルスの時間幅 τ は約500 μ sで、このパルスが50Hzで繰り返される。つまりパルスとパルスの間隔Tは20msである。ビームのデューティーは

$$D = \tau / T \quad (1)$$

と定義されるので、この場合デューティーは2.5%となる。イオン源から出たビームは90%以上の高効率でRFQによってバンチされ、3MeV

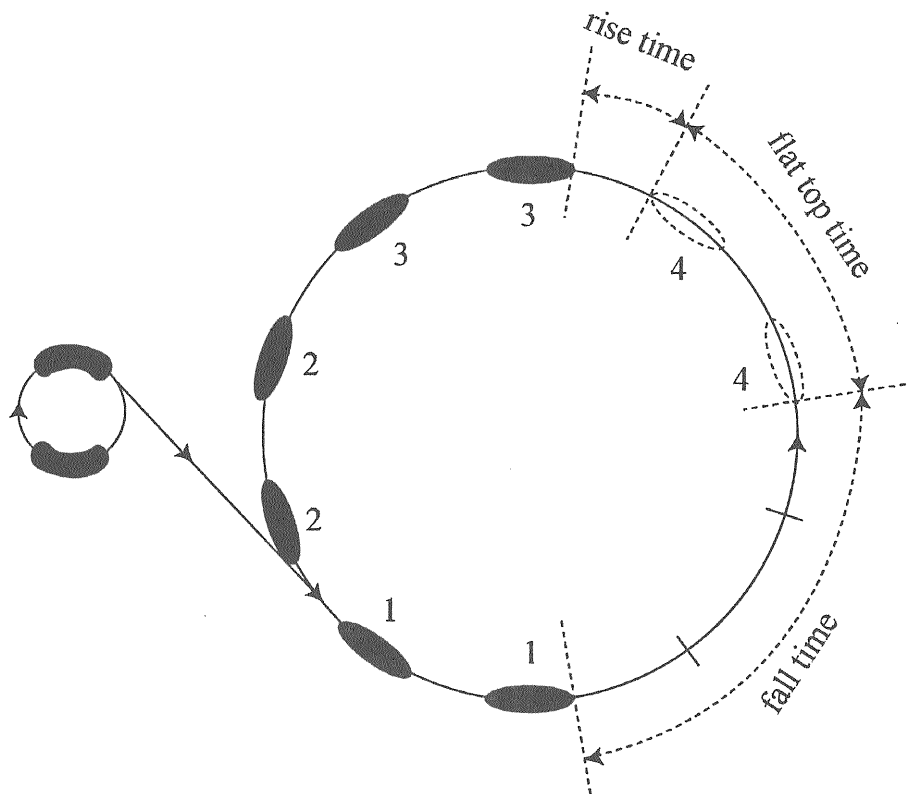


図3 50 GeVリングへの入射の様子

まで加速される。このビームバンチの周波数はRFQの共振周波数 $f=324\text{MHz}$ と同じである。RFQを出たところで要求されるパルス中のビーム強度 I_{peak} （ピーク強度）は 50mA である。このとき、1パルスあたりのビーム粒子数は、

$$N_p = \frac{I_{\text{peak}} \times \tau}{e} \quad (2)$$

から求めることができる、ここで e は陽子の電荷で $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ である。従ってこの場合、 N_p は 1.6×10^{14} 個/パルス(ppp)となる。また平均電流 I_{av}

$$I_{\text{av}} = \frac{I_{\text{peak}} \times \tau}{T} \quad (3)$$

は 1.25mA となる。1パルスの中のバンチ数は $t \times f = 1.62 \times 10^5$ 個となるので、1つのバンチあたりの粒子数は(2)式で求めた値をこのバンチ数で割って 1.0×10^9 個となる。RFQとDTLの間には、チョッパーと言われる 1.36MHz の繰り返し

返しでビームを蹴り出すディフレクターが置かれる。この繰り返しは 3GeV リングの加速周波数と同じである。なぜこのチョッパーが必要かは、あとの章で述べることにする。このチョッパーによって、ビームは 1.36MHz の繰り返しの歯抜け構造を持つことになる。ビームが存在する時間幅とビームがない部分の時間幅の割合は、それぞれ 54% 、 46% である（チョッピングファクター 54% ）。歯抜け構造を持つビームは、DTL、SDTLによって 191MeV まで加速される。ACSの共振周波数は3倍の 972MHz であるので、ACSでは高周波の波の2つおきにビームバンチが存在することになる。ACSによって 400MeV に加速されたビームのうち半分の 25Hz 分が 3GeV リングに入射される。この時点でのビーム強度は1パルスあたり、 $0.54 \times 1.6 \times 10^{14} = 8.6 \times 10^{13}$ 個、平均電流は $1.25\text{mA}/2 \times 0.54 = 0.338\text{mA}$ となり、デザイン値である $8.3 \times 10^{13}\text{ppp}$ 、 0.333mA とほぼ一致する。 3GeV 行きのビーム出力は 133kW である。残りの 25Hz 分 0.333mA のビームは超伝導リニアックによって 600MeV まで加速され核変換実験施設に供給される。このときのビーム出力は 200kW である。図2で以上述べたリニアックビー

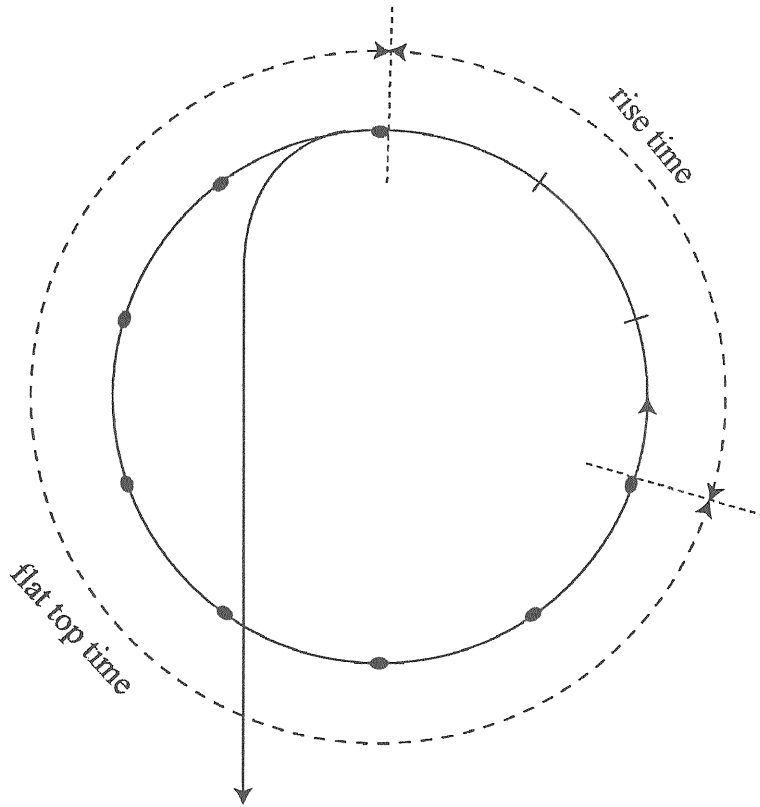


図4 50 GeVリングからの出射（早い取りだし）

ムの時間構造を示す。

3 GeV PSの加速繰り返しは25Hzで、2つのバンチがリングに存在する（ハーモニック2）。このとき加速周波数はビームの周回周波数の2倍となる。リニアックからのビームロスを見無視すると、リングを回る粒子数は 8.3×10^{13} 個である。1つのバンチ当たりの粒子数はこの半分である。3 GeVまで加速された2つのバンチはリングから取り出される。これが25Hz（40msごと）で繰り返される。3 GeVビームの出力は1MWとなる。

3 GeV PSからの40msごとのビームパルスを連続4回分（4バッチ）、パルス電磁石で振り分けて50 GeVリングに入射させる。50 GeV PSは3 GeV PSの周長の5倍になっているので、原理的には5バッチ（10バンチ）を入射することができるが、入射・早い取りだしキッカーの立ち上がり時間から、2バンチ分をわざと空けておく。つまりリングには8つのバンチが回る。この状況を図3で示す。この図では、既に3バッチ分が入射し、点線のところに4つめのバッチが入るところを示している。リング中の粒子数は、3 GeV PSリング中の粒子数の4倍の 3.3×10^{14} pppである。50 GeV PSの加速周期

は3.3秒であるので、平均電流は約15 μ A、加速ビームの出力は750kWとなる。早い取りだしでは、8つのバンチがそのまま取り出される（図4）。遅い取りだしでは、0.7秒という長い時間かけてゆっくりと取り出される。

第3章 ビームロス

ビームロスとは簡単に言うとビームの一部分が何らかの原因で真空ダクトや他のものに当たることにより失われることを言う。ビームロスがもとのビーム強度に比較してあまり問題にならないくらい少なければ（例えば数%）、実験施設でビームを使用する側の立場からすると、強度の減少分が問題となることはないであろう。ところが大強度陽子加速器では、例えこの程度のビームロスでも、実は大問題となるのである。いかにしてビームロスを減らすかがこの加速器の最も重要な課題であると言っても過言ではない。この章では、大強度陽子加速器でなぜそのようにビームロスが問題になるのかを説明し、その後でビームロスの原因とその対策について述べる。

3-1 ビームロスがあると何が問題となるのか

高エネルギーの陽子ビームが真空チェンバーやマグネット等の機器に当たると、核反応がおこり中性子等の2次粒子が発生する。この事によってどんな不都合が起きるかをまとめると以下のようになる。

- (1) ビームロスが起こると、その周辺の機器が放射化するため、ビームを止めてもメンテナンスのために近づいた人が被爆する。
- (2) トンネル周辺の土や地下水が放射化する。
- (3) ビームロスが起こっているときに、発生した放射線が遮蔽から漏れだすことによって、人間が直接被爆する可能性がある。ストリーミングやスカイシャインによる被爆もこれに当てはまる。
- (4) 冷却水やトンネル内の空気が放射化する。
- (5) ビームロスが起きた周辺の機器に放射線によるダメージを与える。

以下でこれらの点をもう少し詳しく説明することにする。

3-1-1 被爆線量基準と管理区域区分

高エネルギー加速器研究機構で定められた放射線作業従事者に対する「被爆線量当量を管理するための目安基準」を表5に示す。この表によると1日の被爆量の管理基準値は500 μ Svとなってい

るが、KEK-PSの実際の被爆管理では、この値より若干少なめの300 μ Svを目安としている。本計画の基準もこの目安基準を参考に決められると考えてよい。管理区分は線量により区分される。また区域内の表面汚染の程度差で第1種管理区域（汚染区域）と第2種管理区（非汚染区域）に分類される。表6は本施設で検討されている放射線管理区域区分の考え方をまとめたものである。これによると線量率が0.25 μ Sv/h以上になる場所は管理区域となる。加速器トンネル内は機器の表面汚染が起こるため、第一種管理区域となる。

表5 KEK被爆線量の目安基準
(mSv/h)

1日	0.5
1週	1
1年	10（男子） 2（女子）

表6 本施設管理区域区分(案)

線量率区分

区域	線量率
一般区域	0.25 μ Sv/h以下
警戒区域	1.3 μ Sv/h以下
管理区域	1.3 μ Sv/h以上

管理区域区分

種類	適用場所例
第一種管理区域 (汚染)	加速器トンネル全域、 機械室一部
第二種管理区域 (非汚染)	搬入室1階、 機械室一部

3-1-2 放射化による被爆

ビームロスが起こることによって最も深刻な問題は機器等の放射化である。ビームロスによって生成される長寿命放射性核種の崩壊で放出される放射線によって、メンテナンス時に多量の被爆をする可能性がある。

メンテナンス時の被爆がいかに深刻かということを理解するためには、KEK-PSの実例を見るのが最も早道であろう。KEK-PSの遅い取りだし運転でのビームパワーは数kWで、リング

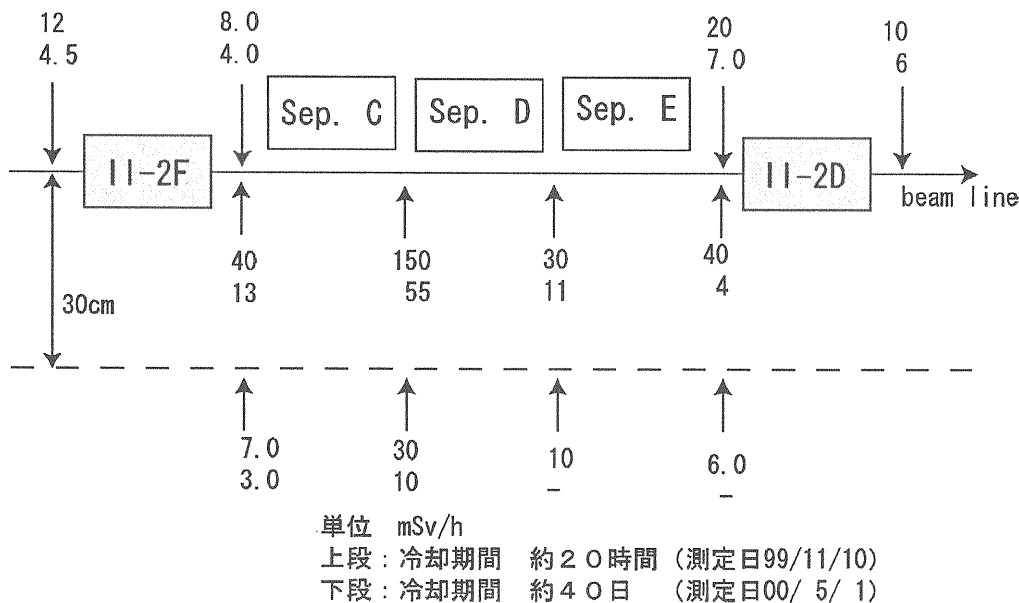


図5 取りだしセプタムマグネット付近の放射化による線量
 (KEK-12 GeV PS)

表7 KEKPS関係者個人被曝線量
 (1999年4月～12月)

被曝線量 (mSv)	人数 (人)
0	3
0～1	37
1～2	10
2～3	2
3～4	3
4～5	1
5～6	0
6～7	0
7～8	1

内でおこるビームロス全部で400W程度と推定されている。図5はKEK-PSの遅い取りだし運転でビームを止めてから20時間後と40日後(冷却期間)に測定されたセプタム電磁石の周辺の放射線レベルの例である。ビームダクト表面とそこから30cm離れた場所の線量が測定された。これをみるとわかるように、冷却期間が20時間程度という短い時間では、ビームダクト表面で100mSv/hを越えるような極めて線量が高い場所が存在する。冷却期間を40日とすると、線量も数分の1に下がることがわかる。こうした高放射線環境においても、重故障したセプタムマグネットの

交換作業が実際に行われた。仮に1 mSv/hの線量環境で作業を行った場合、1日の被曝量の目安300μSvを守るためには、1人20分の作業時間しか許されない。したがって高放射線場での作業は人数を増やすことで対応することになる。表7はある年のKEK-PSで作業を行ったスタッフの被曝線量の統計である。年間で7 mSv/hを越える被曝をしたスタッフが存在することは驚嘆に値する。被曝量が多いスタッフは取りだしを担当しているグループに属している。このような被曝量は世界の加速器施設を見渡してもトップクラスであろう。本加速器ではビーム強度がKEK-PSのおよそ100倍程度であるので、ビームロスを極めて低い値に抑えなければならないということがこの例からわかる。それができない場合は何らかの方法で被曝を避ける対策をとることが必須である。もし許容できる線量を超えて運転を行い、機器の交換等の作業をする必要が生じた場合は、加速器を停止し放射線レベルが許容値に下がるまで待つ以外には方法がない。これは加速器の運転スケジュールを大幅に遅らせることにつながる。

3-1-3 トンネル構造と土の放射化

通常加速器は地下に埋設されたコンクリートトンネル内に置かれる。このコンクリートはトンネルの構造物としてだけでなく、放射線遮蔽の役

割を兼ねている。ビームロスによって発生した放射線がトンネル外側の土・地下水が放射化する。放射化した土の成分は地下水にしみだし敷地境界外に流れだす可能性がある。本施設における土の放射性物質濃度の目標値は規制免除濃度の20分の1の3.7Bq/ccに設定された。この濃度に対応する線量当量は11mS/hである。安全係数を約2として5mS/hが本施設土壌での線量当量目標値と決められた。したがってこの値を超えないようにコンクリートの厚さが決められる。この値は線状に分布するビームロス（線線源）に適用される。点線源にたいしては、地下水への影響が少ないと考えられるので、11mS/hがそのまま目標値となっている。トンネル上部はコンクリート表面の土の放射化以外に、地表の線量率を考慮する必要がある。地表の線量率はトンネル上部のコンクリートの厚さと土の厚さで決定される。コンクリートと土による遮蔽効果が満足できない場合は鉄板をその間に挟むことになる。トンネル上部の地表は一般区域の条件である0.25 μ Sv/h以下にすることが望ましいが、一部のビームロスが大きいところの地表は数 μ Sv/hとなり管理区域の設定が必要となる。次のセクションで述べるスカイシャインを考慮して、トンネル上部遮蔽厚が決まる場合もある。

3-1-4 ストリーミングとスカイシャイン

機器を搬入するための建物（搬入棟）、冷却水・空調機器が置かれる建物（機械棟）、電源が置かれる建物（電源棟）と主トンネルの間は、貫通口、大型のものでは補助トンネルでつながっている。主トンネルで発生した中性子は、この通路の壁で多数回散乱され減衰しながらも、これらの建物まで到達する。このように放射線が通路を通して漏洩してくる現象をストリーミングという。基本的には、ストリーミングによる放射線線量を一般区域並みに抑えることが望まれる。

ストリーミングを減らすために一番大事なことは、当たり前ではあるが、主トンネルでビームロスが少ないと想定されているところに、通路を取りつけることである。通路での減衰効果を大きくするためには、通路の断面積を小さくする、通路長を長くする、通路に屈曲部をつくる（迷路構造にする）というのが効果的である。ただし通路長を長くすることはコスト増につながる。通路の断面積や搬入通路での屈曲構造は大型機器の搬入の

仕方を考慮して慎重に決めなければならない。

スカイシャインとは、ビームロス等によって発生した放射線が遮蔽を漏洩して地上に到達し、到達した放射線が空気によって散乱され、地表に降り注ぐことを言う。本施設で最も問題になるのは、中性子によるスカイシャインである。スカイシャインを減らすためには、ビームロスが起こる場所の上部の遮蔽を強化する以外にはない。スカイシャインは施設内のみならず、一般住民が居住する敷地境界外にも影響を及ぼすので注意が必要である。敷地境界での線量は全施設からの寄与をあわせて1年間で50 μ Sv以下にしなければいけない。

3-1-5 空気の放射化

本加速器では、当然のことではあるが、ビームを出しているときには、加速器トンネル内に立ち入ることは全くできない。ビーム加速中は、トンネル内空気の放射線レベルが高くなるため、空気は排出しないというのが本加速器施設の基本的考え方である。この場合ビーム加速中空気は冷却循環されるのみとなる。ビームを止めると、半減期の短い核種の崩壊により空気の放射線レベルが下がる。気体の放出レベル以下になった段階で、トンネル内空気をスタックを通して排出し、外気を取り入れることになる。トンネル内空気の放射線レベルが下がった段階で、はじめて人がトンネル内に入り作業ができるようになる。空気の放射化で主に問題となる長寿命核種はトリチウム（半減期12.3年）とBe⁷（半減期53.3日）である。

3-1-6 冷却水

ビームロスが起こると、その近くを流れている冷却水が放射化する。ビームロスが多いと思われる場所では極力冷却水を使わないという考え方が望ましいわけであるが、現実にはそうできない場合が多い。例えばマグネット付近でビームロスが起こった場合は、マグネットコイル中の冷却水が放射化する。放射化量はそのコイル中の冷却水の体積に比例する。ビームを止めると短半減期の核種は崩壊し冷却水の放射線レベルは下がる。放射性核種で問題となるのが長寿命のトリチウムである。冷却水のトリチウム濃度は定期的に測定され、定められた排出基準濃度である60Bq/ccの半分を目安として、冷却水の入れ替えを行うことにな

る。

3-1-7 機器等の放射線ダメージ

ビームロスが起きるとその周辺機器等に放射線損傷が生じ、トラブルを引き起こす。最も問題となるのが電磁石のコイルに使用されている絶縁物のダメージであろう。磁石等に使用するケーブルやトンネル内にある施設機器の損傷も問題となる可能性がある。

3-2 ビームロスが起こる原因と対策

3-2-1 残留ガスの影響

ビームが通る真空ダクト中には、水・窒素等の残留ガス成分が存在する。ビームはこの残留ガス成分によって散乱され、エミッタンスが増大する。ビームが通るダクトの真空圧力は、このエミッタンス増大が無視できる程度にデザインする必要がある。また、リニアックで加速するビームは H^- であるが H^- イオンの場合、残留ガスとの相互作用で電子が剥ぎ取られる確率が無視できない。したがってリニアックのラインの真空は、この荷電変換によるビームロスが設定されているビームロスに比較してあまり問題にならない程度にしなければいけない。本計画のリニアックの真空圧力は 1×10^{-8} torr 以下、 $3 \text{ GeV} \cdot 50 \text{ GeVPS}$ の真空圧力は 10^{-8} から 10^{-9} torr が目標値になっている。 $3 \text{ GeV} \cdot 50 \text{ GeVPS}$ の場合、イオンポンプの寿命を考慮して、散乱効果で決まる真空圧力よりも余裕をみた設定になっている。

3-2-2 ローレンツストリッピング

H^- イオンの外側にある電子の束縛エネルギーは小さいので、強い磁場を通過するときイオンの静止系で感じる電場によって、この電子は剥ぎ取られ H^0 原子になる。この現象をローレンツストリッピングと言う。 H^- イオンの寿命は磁場もしくはイオンの速度が大きくなると短くなる。従って速度が速くなった H^- ビームが通過する場所の偏向電磁石の設定磁場は強くすることができない。

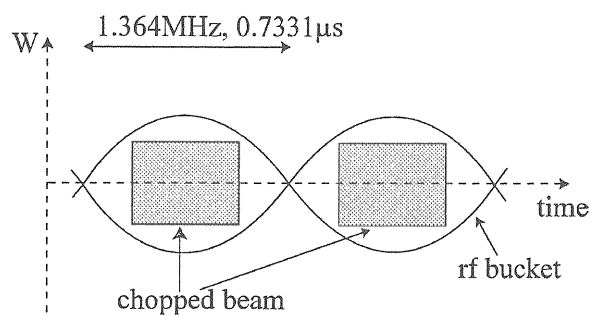


図6 チョップドビームとRFバケツ

3-2-3 RFキャプチャのロス

リニアックからのビームは有限のエネルギーの広がりを持っているため、何もしないとRFバケツからはみ出してしまうビームができる。はみだたビームは加速されずにビームロスになる。これを避けるために、リニアックのビームをあらかじめ図6のようにチョッピングしておく。

3-2-4 荷電変換フォイル

3 GeVPS の入射では H^- イオンを H^+ イオンにするために、荷電変換炭素フォイルが使用される。 H^- が H^+ に変換する効率は残念ながら100%ではなく、フォイルを通過することによって、 H^0 もしくは再度 H^- となってでてくるものがある。ただしある程度厚いフォイルを使用すれば H^- になる確率は無視できる。 H^- が H^+ イオンに変換される効率を上げるためには、フォイルの厚さを増やせばよいのだが、厚さを増やすと、フォイルによる散乱でエミッタンスの増加がおおきくなる。 3 GeV リングのシナリオでは、フォイル通過後に存在する H^0 イオンは H^+ イオンとは違う軌道を走り、 H^0 を H^+ に変換させるためにもう一つのフォイルを通させ、入射ダンプに導く。ここで注意する必要があるのは生成される H^0 の励起状態は H^0 が2つめのフォイルを通過する前に磁場によってイオン化される確率があることである。この過程によって発生したイオンの一部はビームロスとなる可能性がある。

3-2-5 スペースチャージ効果

スペースチャージ(空間電荷)効果を簡単に言うと、大強度ビーム自身がつくるクーロン力に起

因する効果ということができる。スペースチャージ効果は、大強度陽子加速器の最もやっかいな問題と言っても過言ではない。スペースチャージ効果は、同じイオンどうしの反発力に起因しているのであるから、マクロ的に見てもビームを発散させる効果がある。

リング

リングの場合、スペースチャージによる効果を定量的に議論するとき、ラスレットのチューンシフトといわれる式を使う。これはビームが一様分布していると仮定した場合に働く線形の発散力が、ベータートロンチューンをずらす量を解析的に求めたものである。 n_t をリングを回っている全粒子数、 r_p を陽子の古典半径、 ε をビームの非規格化エミッタンス、 β, γ をローレンツファクターとするとラスレットのチューンシフトは、イメージ電流によるフォームファクターを無視すると、

$$\Delta\nu = -\frac{n_t r_p}{2\pi\beta^2\gamma^3} \frac{1}{B_f} \quad (4)$$

となる。ここでバンチングファクター B_f はリングで平均した電流 I_{av} とピーク電流 I_{peak} の比

$$B_f = \frac{I_{av}}{I_{peak}} \quad (5)$$

で表される。従って同じビーム強度で、スペースチャージによるチューンシフトを小さくするためには、エネルギーをあげるか、バンチングファクターを上げることになる。もしスペースチャージ力が線形のみならば、四極磁石の強さを強めることによって、チューンシフトをキャンセルすることができる。しかし実際のビームは一様分布になっているわけではないので、非線形の部分からくるベータートロン振幅に依存したチューンの広がりをもつことになる。この広がり大きさを議論するときにも(4)式の値が1つの目安として使われる。

リング加速器では、ビームは何回も同じ場所を通る。リング内にエラー磁場による共鳴現象が起きると、ビームのサイズが広がりビームロスとなる。これを避けるために、ベータートロン振動数(チューン)は、いくつかの強い共鳴線避ける

ように選ばなければいけない。スペースチャージによるチューンスプレッドがあると、その一部分が共鳴にひっかかりビームロスとなる可能性がある。最も強い共鳴は整数共鳴で、次に強いものは半整数共鳴である。50 GeVPSのようなリングでは、ビームが入射エネルギーのままでいる時間も長く(50 GeVPSの場合は120ms)、より高い3次、4次の共鳴も危険である可能性がある。従ってチューンスプレッドはこれらの共鳴を避ける程度に抑えることが必要である。本加速器でスペースチャージ効果を小さくするための方法が取り入れられているので、以下で紹介する。

(a) バンチングファクターを増やす方法

(4)と(5)式からわかるように、ビーム強度が同じときはピーク電流を下げるとチューンスプレッドを小さくすることができる。ピーク電流を下げるということは、バンチのなかのビーム密度を下げることを意味する。その1つの方法として、3・50 GeVPSでは加速高周波に2倍の高調波を加えることを検討している。高調波を加えた場合の加速電圧分布は、進行方向のビーム密度を一様にする方向に働く。その結果ピーク電流を下げるができる。もう1つは、進行方向のエミッタンスを強制的に増大させる方法である。ビームの縦方向のサイズが広がることになりピーク電流を下げるができる。50 GeVPSで入射時のスペースチャージによるビームロス避けるために、あらかじめ縦方向のエミッタンスを広げておくことが必要とされる。縦方向のエミッタンスを広げない場合(3eV・s)のチューンスプレッドは0.3となり、これは大きすぎる値である。エミッタンスを10eV・sまで広げると、チューンスプレッドは0.16まで下がる。また進行方向エミッタンスの増加は加速エネルギーでのビーム不安定性を抑制するためにも必要である。

(b) 横方向のエミッタンスを増やす方法

3 GeVPSへのビームの入射は入射効率の高い荷電変換方法が採用されている。入射時にバンチ軌道をつくりその間に荷電変換フォイルを置くことによって、リニアックからのH⁻ビームとリングにすでに入射したビームを同じ軌道に乗せることができる。しかしこのままではスペースチャージ力により、大電流のビームを蓄積することはできない。そこでバンチ軌道を入射中に変化させ、横方向の位相空間の違う場所にビームを入射する(ペインティング)。言い換えると、ペインティングを行うことによって(4)式でエミッ

タンスを大きくし、ビーム強度が増えることによるチューンスプレッドを増やさないようにするのである。

リニアック

リニアックでは、スペースチャージによるベータトロン振動、位相振動の安定性の限界から得られる電流リミットがよく議論される。本加速器のリニアックで加速するビーム強度はこのリミットよりは低いものの、スペースチャージ効果が重要となるビーム強度と言うことができる。

RFQペインをデザインする際には、スペースチャージ力を取り入れ、その場合でもビーム透過効率をあげ、横方向のエミッタンス増加や進行方向のエミッタンスを小さくする工夫がなされている。

3-2-6 Equipartitioning

D T L 以降のリニアックの収束には、equipartitioning という概念が取り入れられている。この考え方では、横・縦のエミッタンスを熱力学的な温度という観点から解釈する。一般的に採用される横方向の位相の進みを加速エネルギーによらず一定にする収束方法では、横方向の収束が縦にくらべて強くなる。これによって横の温度が縦の温度よりも高くなりすぎて、横の運動が縦に移り、縦方向のエミッタンスが増加する。横と縦の温度を同じに保つためには、横方向の収束を加速エネルギーとともに弱くすればよい。この場合、ビームサイズはエネルギーとともに増大することになる。従ってエネルギーが上がるに従って大きなアパーチャーを必要とするが、ビームサイズが大きくなることによってビーム密度が減りスペースチャージ効果が緩和されるということも期待される。

3-2-7 トランジションエネルギー

一般的なFODOラティスを採用したKEK 12 GeVPSのような陽子シンクロトロンでは、加速途中でトランジションエネルギーを超える。トランジションエネルギーの下では、運動量の大きい粒子は、小さい粒子より早くリングを周回する。しかし、粒子のエネルギーがトランジションエネルギーの上では、逆に運動量の小さい粒子のほうが早くリングを周回する。通常の

リングでは常にディスパージョンが正であるので、運動量の大きい粒子は小さい粒子より軌道がふくらみ粒子が通るパスが長くなる。エネルギーの低いときには、このパスの違いによる時間の遅れより、粒子の運動量が大きいことによる時間の短縮のほうが打ち勝つ。トランジションエネルギーの上では、逆にパスが長くなることによる時間の遅れが優勢になるのである。トランジションエネルギーでは、位相安定性が失われることと、ビーム不安定性がおこり易くなることから、ビームロスがおこる危険性が高い。50 GeVPSでは、トランジションエネルギー γ_T が複素数となる加速の途中でトランジションエネルギーを超えないラティスが採用されている。3つのDOFOを1つのモジュールと考えるとき、真中のセルの偏向電磁石を抜き特別な周期性をもたせることによって、両側のセルで負のディスパージョンをつくっている。その結果モーメントムコンパクト化因子 $\alpha=1/\gamma_T^2$ を負つまり γ_T を複素数にすることができる。

3-2-8 入射、出射

リングの入射部・出射部にはセプタム電磁石が使われる。このマグネットではセプタムといわれるコイルが、周回ビームと入射・出射軌道との間の狭い空間に置かれるため、この部分で通常ビームロスが起こる。これを避けるためにはあらかじめ周回ビームと入射・出射ビームの軌道の空間的な余裕をなるべく多くとっておくことが望ましい。しかしこのためには、併用されるキッカーの蹴り角や前後のQマグネットのアパーチャーのクリアランスが障害になる場合がある。

3-2-9 遅い取り出し

前セクションのセプタムマグネットでのビームロスとは別に、50 GeVPSで行われる遅い取り出しのビームロスは本質的に起こるものである。このビームロスは本計画加速器で起こるビームロスで最も深刻なものの1つと言うことができる。遅い取り出しでは、非線形磁場によってビームのサイズを少しずつ大きくし、静電セプタムと言われる装置のアースワイヤーと高電圧電極間にできた電場でビームをわずかに蹴り、下流のセプタム電磁石の位置で周回ビームと静電セプタムで蹴られた取り出しビームの空間的な広がりをつく

る。従ってビームの一部分は静電セプタムのアースワイヤーに必然的にあたりビームロスとなるのである。遅い取りだしのビームロスを減らすために50GeVPSでは、以下の工夫をすることによりビームロスを1%程度におさえることをねらっている。(i)収束四極電磁石を2つ隣接させるビーム光学系をつくり、その間に静電セプタムを置く。このことによって取り出しビームの水平方向のサイズを大きくとることができるので、ワイヤーに当たるビームの量を減らすことができる。(ii)取り出しの途中でバンプ軌道を変化させることにより、静電セプタムにやってくるビームの角度の広がりを小さくする。(iii)ビームの運動量の広がりによる効果を減らすために、機器が置かれる長い直線部は運動量分散がない光学系が組まれている。(iv)静電セプタムのワイヤーはできるだけ細いものを使用する。

3-2-10 ミスアライメントとエラー磁場

磁石のミスアライメントと磁石自身が持っているエラー磁場は、ビーム軌道をずらしたり、収束の周期性を乱したり共鳴を励起したりすることでビームロスの原因となる可能性があるため、これらの影響を相殺する磁石が必要となる。1つだけ例をあげると、Q磁石にミスアライメントがあると、ビームがキックされ、ビームの中心軌道がデザインの軌道からずれる(COD)。その結果実効的なアパーチャーが小さくなりビームロスの原因となる。ステアリング電磁石によるCODの補正はリニアック、ビームライン、リングとも必須である。

3-2-11 ビームロスの局所化

ビームのテイルはビームロスを引き起こす可能性があるわけであるが、メンテナンスを頻繁にするようなところでロスが起こるよりは、テイルの部分を積極的にカットして、ビームロスを局所化するという考え方も有効である。この場合、ビームロスが起こったところを局所遮蔽するのが有効である。一般にビームをカットする装置をスクレーパーもしくはコリメーターと言う。ビームが当たる部分は板もしくはブロックでできていて、その部分にビームのテイルを強制的に当てて削る。スクレーパー付近はもちろん高放射化するので、その周りを鉄等の遮蔽で囲むことが必要であ

る。スクレーパーで散乱された粒子が新たな放射化を生む場合には、適切な場所にスクレーパーと同じような構造をもったコレクターと言われるものを置き、そこで2次粒子を集めることが有効である。

H⁻ビームのテイルを削る場合は、ビームのテイル部分を荷電変換のためのフォイルに通し、H⁺状態にするのが有効である。生成されたH⁺ビームは下流に置かれるダンプに捨てる。

3-2-12 機器等の耐放射線性の向上

トンネル内機器はビームロスによる放射線ダメージを受ける。従って線量が多いと想定される場所の機器の材質は耐放射線性の強いものを選ばなくてはいけない。耐放射線性が低いゴムオーリングを真空もしくは冷却水シールに用いたり、絶縁のためにテフロンを使用するようなことは極力避けなければいけない。

また、通常使用される電子機器には、放射線損傷を受けやすい部品である半導体、コンデンサー等が含まれる。従ってアンプや制御機器などはトンネル内には置かないというのが望ましい。やむを得ないときには、機器の周りに遮蔽体を置くようにするか頻繁に交換をすることを覚悟するかのどちらかである。

3-2-13 機器メンテナンスシナリオ

加速器のメンテナンスをするときに機器の放射化によって作業者が被爆するわけであるが、作業時の被爆量は作業時間に比例する。従っていかにして作業時間を短くできるかが被爆を減らす最も重要なポイントとなる。1つの例をあげると、真空フランジは、ボルトで締めつける構造だと締めつけ・取り外し時間がかかるので、できるだけクランプチェーンで締め付ける構造にする。

重量物の搬送、取り外しや据付作業には、走行クレーンがあると便利である。しかし偏向電磁石等の重量物を吊り上げられるクレーン仕様のトンネル構造は大幅なコスト増につながる。したがって、他の方法で搬送や取り外し・据付が可能ならばその方法を採用することになる。機器の重故障時には機器自体を交換する必要がある。その場合、機器の取り外し・搬出、新しい機器の搬入・据付のシナリオは、あらかじめ十分に検討しておくことが必要である。コリメーター等の放射化の

極めて強い場所では、前後の真空フランジの自動着脱、またはコリメーター本体の自動着脱も必要となる可能性がある。

3-2-14 その他

大強度ビームを扱う場合に重要な項目は、ビーム不安定性対策やビームローディング対策があげられる。シンクロトロンにおいて、電源が違う磁石間の磁場の相関を合わせるトラッキングの問題、加速空洞の位相・電圧の安定性、ビームモニタリングの精度・信頼性の確保も重要な課題となる。

3-3 本計画加速器のビームロスの設定値とアボート・ダンプ

KEK陽子加速器もしくは関係するビームラインでの経験から、線状にビームロスが起こる場合、ビームロスは1W/m以下にすることが望ましい。これはビームロスがこの値を超えると被爆によりメンテナンスに支障をきたすということを意味する。点状ビームロスにたいしては、これといった基準は存在しない。この場合、ビームロスが強いところはローカルに遮蔽を施すといった対策をとることになる。

まずリニアックのビームロスの考え方を説明する。RFQでは必然的にバンチングの過程で5%程度のビームをこぼす。しかしロスするビームのエネルギーは極めて低いため、放射化という意味では問題にならない。RFQ-DTL間にあるコリメーターでチョップされたビームはロスとなる。この量は0.8kWと大きいエネルギーが低い問題にならない。この輸送系のビームロスは3W/mとなっている。RFQ以外の全加速空洞でのビームロスは0.1W/mと設定されている。16mあるSDTL-ACS間では、はじめの10m分は0.1W/mで、残りの5mはロスが多い可能性があるため1W/mとなっている。ACSの延長線上には生成されたH⁰を捨てるための0.6kWダンプがある。ACS-SCCまでのラインのビームロスの設定値は0.5W/mである。L3BTは、アーク部までは0.1W/m、アークから3GeV VPSまでは1W/mと設定されている。L3BTのアーク部には、リニアックのビーム調整用の5.4kWビームダンプがある。またアーク部には、ビームの運動量

の広がりやテイルをとりぞくためのフォイルがディスパージョンの大きいところに置かれる。フォイルに当たったビームはH⁺となりダンプに捨てられる。90度アーク部が終わったところに、横方向のビームテイルを切るためのフォイルスクレーパーが置かれ、H⁺イオンになったビームは3GeV VPSへのラインと逆向きに曲げられ2kWダンプに捨てられる。ゼロ度方向にはH⁰を捨てるための0.6kWダンプが置かれる。

3GeV VPSの考え方は以下の通りである。入射時に入射点とコリメーターで起こると考えられているビームロスは、全部で平均電流の2%、4kWと仮定されている。また、H⁻ビームの荷電変換効率から平均電流の2%、4kWのH⁺ビームが入射ダンプに導かれる。リングで一樣に起こるロスは1W/mと仮定されている。全周では333Wとなり、1GeVエネルギーでロスが起こるとすると平均電流の0.1%がこのロスで失われる。取りだし時のロスは0.1%、1kWと仮定されている。リング全体でのビームロスは5.33kW、2.2%となる。3GeV VPS取りだしライン下流には、4kWビームダンプがあり、3GeV VPSのビーム調整時やトラブルが生じた際にビームを捨てることできる。

3-50BTのビームロスは1W/mと仮定されている。3-50BT途中にはビームのエミッタンスを制限するためのコリメーターが置かれる。全電流の1%、450Wのビームを削ることができる。

最後に50GeV VPSの考え方を説明する。入射時にアパーチャーが狭い入射セプタム付近でビームロスがおこる。このロスはフルビーム強度の0.3%、135Wと仮定されている。入射直線部にはコリメーターが置かれている。これは主に加速前のビームのテイルを切るためのものであるが、ここで想定しているビームロスは450Wで、3GeVエネルギーを仮定すると全ビーム強度の1%となる。ビームの入射中または加速途中でのビームロスはリング全周に渡っておこると考え0.5W/mと仮定されている。これは全周でみると800W弱のロスであり、ロスするエネルギーを平均15GeVと仮定すると全ビーム強度の0.36%となる。遅い取りだしのビームロスは7.5kW(1%)、早い取りだしのビームロスは1.125kW(0.15%)となっている。遅い取りだしと早い取りだしは同時に行われることはないため、ロスの大きい遅い取りだしの場合で考えると、ビームロスは合計で8.9kW、2.7%となる。50GeV VPSでは、入射エネルギーのビームを捨てるためのアボートシステムと3kWダ

表8 本加速器のビームロスの設定値

<u>リニアック</u>		
加速空洞	0.1W/m	
RFQ-DTL BT	3W/m	
SDTL-ACS BT	0.1W/m、1W/m	
<u>L3BT</u>		
アーク手前まで	0.1W/m	
アーク以降	1W/m	
<u>3GeVPS</u>		
入射点と		
コリメーター	4kW	2%
リング全周	1W/m(333W)	0.1%
取り出し	1kW	0.1%
合計	5.33	2.2%
<u>3-50BT</u>		
コリメーター	450W	1%
コリメーター以外	1W/m(200W)	0.44%
<u>50GeVPS</u>		
入射	135W	0.3%
コリメーター	450W	1%
リング全周	0.5W/m(800W)	0.36%
遅い取り出し	7.5kW	1%
早い取り出し	1.125kW	0.15%
合計(遅い取出し時)	8.9kW	2.7%
合計(早い取出し時)	2.5kW	1.8%

ンプ、早い取りだし直線部に加速ビームを捨てるためのアポートシステムと7.5kWビームダンプが用意される。

表8は上で述べた加速器施設でのビームロスの設定値をまとめたものである。

3-4 本計画加速器のエミッタンスとアクセプタンスの考え方

リニアックから3GeVPSにやってくるビームのエミッタンスは 4π mm・mradと想定されている。3GeVPSのペインティング入射により、水平・垂直方向ともエミッタンスは 144π mm・mradになる。リングに入射後スペースチャージによりエミッタンスが増加する。この量はシュミ

レーションの予測をもとに1.5倍とし、その結果エミッタンスは 216π mm・mradになる。これ以上の振幅を持ったビームはコリメーターで削り落とす。3GeVリングのアクセプタンスは、さらに1.5倍の余裕をもって 324π mm・mradに設定されている。

216π mm・mradのエミッタンスを持つ400MeVビームが3GeVに加速されると、ダンピングの効果のみを仮定すると 54π mm・mradになる。3-50BTの途中にはコリメーターがあり、 54π mm・mradより振幅が大きいビームは削り落とす。50GeVPSのアクセプタンスは1.5倍の 81π mm・mradに設定されている。50GeVリング中にもスクレーパーが置かれ、この場所でアパーチャーが最小になるようにする。

第4章 本計画のスケジュールとアップグレード

4-1 本計画のスケジュール

大強度陽子加速器建設は第1期分と第2期分に分けられている。現在の予定では、第1期分の施設は平成13年度から18年度までの期間で建設される。第2期分の施設建設は第1期途中からスタートすることが望まれている。第1期と第2期の内訳は

第1期分

- リニアック 400MeVまで
- 3GeVPS 全部
- 50GeVPS フライホイール無し
(加速エネルギー30GeV程度)
- 物質・生命科学実験施設
- 原子核・素粒子実験施設

第2期分

- リニアック 400～600MeV
(超伝導)
- 50GeVPS フライホイールの設置
(加速エネルギー50GeV)
- 核変換実験施設
- ニュートリノ実験施設
- 物質・生命科学実験施設拡充
- 原子核・素粒子実験施設拡充

となっている。

現在検討されている加速器のスケジュールは以下の通りである。

- リニアック
建設終了とビームテスト開始
H17年度中
- 3GeVPS
建設終了とビームテスト開始
H18年度中
- 50GeVPS
建設終了とビームテスト開始
H18年度中

4-2 本計画のアップグレード

本計画では、パルス中性子源として、ビームパワーを5MWまで増強するアップグレード案が検討されている。1つの案は、RCSの加速エネルギーをあげ、それと同じRCSをもう1つ追加する。もう1つの案は、リニアックのエネルギーを大幅に上げ(1GeV)、ストレージリングを新設するというものである。後者は、次の章で述べるSNSやESSと同じ考え方に立つ。

50GeVリングのアップグレード案は以下の通りである。

(1) 加速時間を短くし繰り返しをあげてビーム強度を上げる。

(2) バリアバケット入射により入射時のスペースチャージ効果を低減し、3GeVPSからより多くのバケットを受け入れる。バリアバケット入射という方法は、バンチングファクターを究極的に上げる方法である。この方法は、1サイクルだけの高周波を周回周期ごとに与え、1つの節をもつ長いバケットの中で入射されたビームはコースティング状態になる。次にもうひとつのバリア電圧を加え2つのバリアの位相を変えることによって空間をつくり、そこに次のビームを入射する。そしてこの過程を繰り返すわけである。

以上の2つの方法の組み合わせで数倍のビーム強度を達成することができると考えられている。

第5章 世界の同種加速器と 将来計画

5-1 KEK

KEKで一番最初に建設された陽子加速器である。コッククロフトワルトン型静電加速器で700keVまで予備加速されたH⁻ビームがドリフトチューブリニアックで40MeVまで加速される。H⁻荷電変換法で入射されたビームは、20Hzの繰り返しのブースターシンクロトロンで500MeVまで加速される。ブースターからのビームは中性子・ミューオン実験施設に供給される。ブースターはハーモニック1で運転されるのでリングのなかのバンチ数は1である。ブースターで加速されたビームのうち、9バンチが12GeVPSに入射され加速される。12GeVPSでは2次共鳴を用いた遅い取りだし方法でビームを取り出すコースが2箇所あり、この方法でビームを同時に取り出すことも可能である。またニュートリノ振動実験のためにこの取りだしコースの1つは、早い取りだしでビームを取り出すことができるように改造された。早い取りだし運転のときの運転周期は2.2秒で、 7×10^{12} 個の粒子を供給している。従ってこのときの平均電流はおよそ0.5 μ Aとなりビームパワーは6kWとなる。遅い取りだし運転では、ビームロスの制限から、早い取りだしのビーム強度の半分以下の強度で運転されている。遅い取りだし運転時のリング全体でのビームロスはおよそ400Wと推定されている。

5-2 LANL

アメリカのロスアラモス研究所では、リニアックとストレージリングの組み合わせによるパルス中性子源が稼動している。入射器はコッククロフトワルトン型静電加速器、201.25MHzドリフトチューブリニアック、805MHzサイドカップルドキャビティの組み合わせで構成され、H⁻ビームを800MeVまで加速する。リニアックの繰り返しは120Hzである。ストレージリングの繰り返しは20Hzで、約60kWのビームを供給することができる。

5-3 RAL

イギリスのラザフォード・アップルトン研究所の加速器は、稼動しているパルス中性子源のなかで世界最大出力のビームを供給する。入射器は665kVコッククロフトワルトン型静電加速器、202.5MHzドリフトチューブリニアックから構成され、繰り返しは50Hz、加速エネルギーは70.4MeVである。ISISと呼ばれるリングは繰り返し50Hzのシンクロトロンである。加速エネルギーは800MeVで、約160kWのパルスビームを供給する。

5-4 FNL

アメリカのフェルミ研究所のメインインジェクター(MI)は、反陽子生成やテバトロンのビーム強度の向上、ニュートリノ実験、フィックスドターゲット実験等を目的として建設された周長3320mのシンクロトロンである。1993年から建設がはじまり1999年に完成し目標のビーム強度での加速に成功している。入射エネルギーは8.9GeV、加速エネルギーは120~150GeVである。このリングでは2次共鳴を利用した遅い取りが行われる。この運転での繰り返しは120GeV加速の場合2.9秒である。ビーム強度は 3×10^{13} pppがデザイン値であるので、120GeV運転では平均電流は1.7 μ A、ビーム出力は200kWとなる。遅い取りだしのビームロスのデザイン値は2.2%で、この場合4.4kWのビームが遅い取りだしで失われることになる。このビームロスのパワーは50GeVPSの遅い取りだしで想定されている値の半分強である。従ってMIの遅い取りだしは、50GeVリングの遅い取りだしのデザインを検討する上でも大いに興味もたれるところである。メインインジェクターの遅い取りだしの本格的なスタディーは2001年秋に予定されている。

5-5 SNS

リニアックとストレージリングの組み合わせで構成されるパルス中性子源で、アメリカのオークリッジに建設される。敷地の工事も既に開始されていて、2006年の完成をめざす。ビーム出力1.44MWを目指している。1GeVリニアックは、402.5MHzのRFQとドリフトチューブリニアック、805MHzのカップルドキャビティリニアック

クと超伝導リニアックから構成される。リニアックの繰り返しは60Hzで、1.44MWに対応するピーク強度は38mAである。1GeVストレージリングは周長約250mで4回対称性をもっている。入射、コリメーター、加速空洞、出射の機能を4つの直線部に分けて配置している。順調に計画が進行するならば、本加速器のパルス中性子源の最大のライバルとなるであろう。

5-6 その他

ESS (European Spallation Source) と呼ばれているパルス中性子源の建設がヨーロッパで検討されている。この計画の加速器は、1.33GeVのリニアックと2つのストレージリングから構成されている。リニアックでピーク電流100mAのビームを加速し、リングにストレージすることにより、出力5MWのパルスビームを供給することを目指している。

ラザフォード・アップルトン研究所では独自にISISのアップグレードの計画が検討されている。まず現状のISISリングにデュアルハーモニックRFシステムを導入することによって、ビーム出力160kWを240kWにすることが検討されている。新たに800MeVのリニアックと2台の3.5GeVのRCSでビーム出力5MWを目指す案も考えられている。

参考文献

本講義の内容は極めて広範囲なため、真面目に参考文献をあげると膨大なものになってしまう。そこで、まとまった数件の文献のみ紹介することにする。

[1] The Joint Project for High Intensity Proton Accelerators, KEK-Report 99-4.

本計画の提案書

[2] JHF Accelerator Design report, KEK Report 97-16.

JHF加速器のデザインレポート

[3] Spallation Neutron Source Design Manual, June 1998.

SNS計画のデザインレポート

[4] OHO'96 "大型ハドロン計画の大強度陽子加速器"