

FF



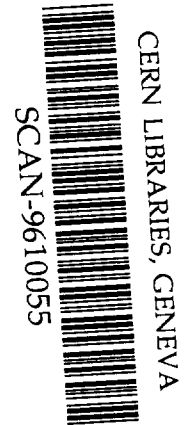
KEK Internal 96-4
July 1996
A/R

Design for the Radiation Protection of the ATF Damping Ring

Y. NAMITO, N. TERUNUMA, H. HIRAYAMA

and

J. URAKAWA



swg642

NATIONAL LABORATORY FOR
HIGH ENERGY PHYSICS

National Laboratory for High Energy Physics, 1996

KEK Reports are available from:

Technical Information & Library
National Laboratory for High Energy Physics
1-1 Oho, Tsukuba-shi
Ibaraki-ken, 305
JAPAN

Phone: 0298-64-5136
Telex: 3652-534 (Domestic)
(0)3652-534 (International)
Fax: 0298-64-4604
Cable: KEK OHO
E-mail: Library@kekvox.kek.jp (Internet Address)

A T F ダンピングリング新設と
放射線安全対策

(放射線取扱施設使用変更承認申請資料)

1996年7月

高エネルギー物理学研究所

目次

| | | |
|-------|---------------------|----|
| 1 | ATF ダンピングリング新設計画の概要 | 1 |
| 2 | 変更の内容 | 1 |
| 3 | 予定使用開始時期 | 1 |
| 4 | 放射線発生装置 | 1 |
| 4.1 | 種類 | 1 |
| 4.2 | 台数 | 2 |
| 4.3 | 性能 | 2 |
| 4.4 | 使用の目的 | 2 |
| 4.5 | 使用の場所 | 2 |
| 4.6 | 使用の方法 | 3 |
| 5 | 使用施設（変更なし） | 4 |
| 5.1 | 使用施設の位置 | 4 |
| 5.1.1 | 地崩れおよび浸水のおそれ | 4 |
| 5.1.2 | 周囲の状況 | 4 |
| 5.2 | 使用施設の形態 | 6 |
| 5.3 | 主要構造物等 | 6 |
| 5.3.1 | 構造の耐火性 | 6 |
| 5.3.2 | 材料 | 6 |
| 6 | 放射線遮蔽計算 | 6 |
| 6.1 | 放射線遮蔽計算の基準 | 6 |
| 6.2 | ビーム損失の推定 | 7 |
| 6.3 | 計算方法 | 13 |
| 6.3.1 | バルク遮蔽 | 13 |
| 6.3.2 | 迷路の遮蔽効果 | 14 |
| 6.3.3 | ダクトストリーミング | 15 |
| 6.3.4 | 敷地境界における年間線量 | 15 |
| 6.4 | 遮蔽計算結果 I（管理区域内） | 16 |
| 6.4.1 | 遮蔽壁外側 | 16 |
| 6.4.2 | 出入口 | 18 |
| 6.4.3 | 非常口 | 19 |

| | | |
|-----------|---------------------------|-----------|
| 6.4.4 | 空調ダクト出口 | 19 |
| 6.5 | 遮蔽計算結果 II (管理区域境界および敷地境界) | 20 |
| 6.5.1 | 管理区域境界 | 20 |
| 6.5.2 | 敷地境界 | 22 |
| 7 | 誘導放射能の推定 | 22 |
| 7.1 | 発生装置室における空気の取り扱い | 22 |
| 7.2 | 冷却水の取り扱い | 24 |
| 8 | 発生装置に係わる安全対策 | 26 |
| 8.1 | ビーム・インターロック装置 | 26 |
| 8.2 | その他の安全に係わる装置 | 28 |
| 8.3 | 発生装置室への入出管理 | 29 |
| 8.4 | 運転の手順と運転状況の表示 | 29 |
| 8.4.1 | リニアック室の運転準備 | 29 |
| 8.4.2 | ダンピングリング室の運転準備 | 30 |
| 8.4.3 | 運転状況の表示等 | 30 |
| 9 | 管理区域の設定と入出管理 | 31 |
| 10 | 標識等を付ける箇所 (変更なし) | 31 |
| 11 | 工事期間等 | 31 |
| | 参考文献 | 32 |

1 ATF ダンピングリング新設計画の概要

本変更申請は、 10^{-8} m・radの低エミッタンスビームを発生できるダンピングリングの開発研究を目的としてATFダンピングリング（設置場所は図1、図2、図3を参照）を新設するために行うものである。

2 変更の内容

本申請に係わる変更内容は以下の通りである。

1. ATFダンピングリングを設置する。また、ダンピングリングのビームを取り出しビーム診断をするためのビームトランスポートラインもあわせて建設し、既設ビームダンプの移設を行う。発生装置室は建設・設定済みであるので変更は行わない。
2. ATF入射用電子線形加速器の使用方法を変更する。これに伴いATF入射用電子線形加速器のインターロックの変更を行う。リニアックインターロック変更の主要な点は、
 - (a) ダンピングリング入射モードの新設。
 - (b) リニアック単独運転時のダンピングリング室入域の全面禁止。である。
3. 管理区域の変更を行う。管理区域出入口も一部変更する。管理区域変更の目的は既に管理区域に設定されている場所のうちニュートリノ振動実験用ビームライン建設工事に係わる部分を一般区域とする事である。

3 予定使用開始時期

予定使用開始時期: 平成8年10月1日

4 放射線発生装置

4.1 種類

本ATFダンピングリング(以下「リング」という事がある。)は、放射線同位元素等による放射線障害の防止に間する法律施行令に定める「シンクロトロン」に該当する。また、本ATF入射用電子線形加速器(以下「リニアック」という事がある。)は、同法律施行令に定める「直線加速装置」に該当する。なお、ATFダンピングリングとATF入射用電子線形加速器を合わせて「発生装置」という事がある。

表 1: 発生装置の加速粒子および最大定格

| | リニアック | リング |
|---------|------------------------|----------------------|
| 加速粒子の種類 | 電子 | 電子 |
| 最大エネルギー | 2.3 GeV | 2.3 GeV |
| 最大平均電流 | 1.6 μ A | 70 mA |
| 最大出力 | 2.464 GeV $\cdot\mu$ A | 107.8 GeV \cdot mA |

4.2 台数

シンクロトロン1台および直線加速器1台。

4.3 性能

本発生装置の性質を示す主要パラメータとして、最大エネルギー、最大平均電流等の最大ビーム特性を、表 1 に示す。リニアック出力は、ビームエネルギー (E_b)、電子の電荷 (q)、バンチ当りの粒子数 (N_e)、パルス当り (トレイン当り) のバンチ数 (N_b) 及び毎秒のパルス繰り返し (f_{rep}) の積で与えられる。従って、最大出力時には、

$$\text{リニアック最大出力} = E_b \times q \times N_e \times N_b \times f_{rep} = 2.464 \text{ GeV} \cdot \mu\text{A} \quad (1)$$

となる。リング出力は、ビームエネルギー (E_b)、電子の電荷 (q)、バンチ当りの粒子数 (N_e)、パルス当り (トレイン当り) のバンチ数 (N_b)、リングを周回するトレイン数 (N_T) 及び 1 秒当たりの周回数 (c/C) の積で与えられる。最大出力時には、

$$\text{リング最大出力} = E_b \times q \times N_e \times N_b \times N_T \times \frac{c}{C} = 107.8 \text{ GeV} \cdot \text{mA} \quad (2)$$

となる。ここで、 c と C はそれぞれ光速 (3×10^8 m/s) およびダンピングリングの周長 (138.6 m) である。

4.4 使用の目的

本発生装置はリニアコライダー開発研究に用いる。主に安定なビームの発生、大出力高周波技術、精密なビーム制御等の加速器開発研究に用いる。ATF ダンピングリングは、 10^{-8} m \cdot rad の低エミッタンスビームを発生できるダンピングリングの開発研究に用いる。

4.5 使用の場所

図 1 に本研究所の全体配置図および本発生装置を使用するアセンブリーホールの位置を示す。変更前後の使用の場所を図 2 および 3 に示す。本発生装置は、図 3 に示すアセンブ

リーホール内の、図 5 に示す普通コンクリートで囲まれた ATF 入射用電子線形加速器室および ATF ダンピングリング室（以下、この 2 室をあわせて「発生装置室」という。）内に設置する。図 5 に示すように発生装置室のうち、ATF 入射用電子線形加速器室を「リニアック室」、ATF ダンピングリング室を「ダンピングリング室」と呼ぶ。（変更前の「BT 室」と「DR 室」は「ダンピングリング室」に統合する。）変更前後の発生装置室の平面および立面図を図 4 および図 5 に示す。なお、アッセンブリーホールには陽子線形加速器実験装置が既に設置されている。

4.6 使用の方法

変更前後の発生装置の各機器の配置を図 6 および図 7 に示す。電子銃で発生した最大エネルギー 240 keV のパルス電子ビームはサブハーモニックバンチャー、プリバンチャーでバンチさせ、さらにバンチャーでバンチさせながら約 2 MeV のエネルギーまで加速する。RF 電子銃を用いる場合は、エネルギー 2 MeV のバンチ電子ビームを直接発生する。この電子ビームを最大エネルギー 2.3 GeV まで加速する。その後、ビームはビーム輸送路を経てダンピングリングに送られる。ダンピングリングで十分にエミッタンスを小さくした後、取り出し路にビームを送り、ビーム診断を行う。リニアックの使用方法として以下の 6 通りの方法がある。

- L1 第一加速管で発生した最大 150 MeV の電子ビームを入射部直後に設置した分析電磁石で 45° 曲げ、ダンプ 1 に捨てる。（変更なし）
- L2 最大 2.3 GeV まで加速した電子ビームを、直線部最下流のダンプ 2 に捨てる。（変更なし）
- L3 最大 2.3 GeV まで加速した電子ビームを、中性子チェンバー内でターゲットに照射する¹。（変更なし）
- BT1 最大 2.3 GeV まで加速した電子ビームを、ビーム診断のためビーム輸送路に取り出し、ビーム輸送路下流部の移動式ダンプに捨てる。（最大電流のみ変更）
- BT2 最大 2.3 GeV まで加速した電子ビームを、ビーム輸送路下流部の移動式ダンプに捨てる。この時、各種実験のため、ビーム輸送路最上流部の偏向電磁石とダンプ 2 の間のビームライン（偏極陽電子発生実験エリア）に物質を挿入する²。2.3 GeV 電子ビーム

¹このモードの利用法としては、例えば中性子スペクトル測定がある。

²このモードの利用法としては、例えば円偏光レーザービームを電子ビームに照射して、逆コンプトン散乱により数 100 MeV の円偏光光子を生成し、これをターゲットに衝突させて対生成により偏極陽電子を生成する実験がある。

はビーム輸送路に曲げられているので、挿入物質を主電子ビームが照射する事はない。
(最大電流のみ変更)

- DR 最大2.3 GeVまで加速した電子ビームを、ビーム輸送路を経てダンピングリングに照射する。

ここで、L1、L2、L3は直線加速器のみを使用しBT部分を使用しない「リニアックモード」である。BT2で発生する逆コンプトン光子および陽電子による線量は微量であるので、本申請書では、BT2とBT1をまとめて「BTモード」として扱う。

リングでは、リニアックから入射したビームのエミッタンスを十分減衰させた後、ビーム取り出し路にビームを取り出しダンプ3に捨てる。³

リングの使用方法としては、以下の2通りの方法がある。

SB 1トレイン1バンチのビームのみがリングを周回する。

MB 1から5トレインのビームが同時にリングを周回する。

本発生装置の性質を示すパラメータとして、各使用方法での最大エネルギー、最大出力等を表2および3に示す。最大出力は、表2および3中の代表的エネルギーと代表的電流を用い、これらの積に等しいとして決定した。

5 使用施設（変更なし）

5.1 使用施設の位置

5.1.1 地崩れおよび浸水のおそれ

本研究所敷地並びに敷地周囲が平地であるので、地崩れのおそれはない。また、本研究所敷地の周囲付近に河川がなく浸水のおそれはない。

5.1.2 周囲の状況

本発生装置は図3に示すように、既設のアセンブリーホールの中に設置する。本研究所敷地境界までの最短距離は約500 mである（図1参照）。

³レーザービームを衝突させ逆コンプトン散乱により数100 MeVの円偏光光子を生成し、これをターゲットに衝突させて対生成により偏極陽電子を生成する実験も予定している。この場合、電子のビームライン上には物質を置かないので、電子ビームと物質の相互作用による放射線の発生はない。また逆コンプトン散乱によって発生する光子による放射線量も微量である。

表 2: 使用方法別最大定格 (リニアック)

| 使用方法 | L1 | L2 | L3 | BT | DR |
|-------------------------------|--------------------|-------|------------------------|------------------------|----------------------|
| 最大エネルギー (GeV) | 0.15 | 2.3 | ← | ← | ← |
| バンチ内最大粒子数 | 3×10^{10} | ← | ← | ← | ← |
| 最大バンチ数 (pulse ⁻¹) | 100 | ← | ← | ← | 20 |
| 最大繰り返し数 (Hz) | 50 | ← | ← | ← | 25 |
| 最大電流 (μA)* | 0.33 | 1.6 | 1.6×10^{-4} | 1.6×10^{-3} | 1.6×10^{-2} |
| 最大出力 (GeV·μA) | 0.05 | 2.464 | 2.464×10^{-4} | 2.464×10^{-3} | 0.02464 |
| 代表的エネルギー (GeV) | 0.15 | 1.54 | ← | ← | ← |
| 代表的電流 (μA) | 0.33 | 1.6 | 1.6×10^{-4} | 1.6×10^{-3} | 1.6×10^{-2} |

* インターロックにより各モードにおける下記の最大出力がこの値を超えないようになっている。

すなわち、DR以外の場合、加速エネルギー > 1.54 GeV の場合、最大電流の 1/2 が電流の上限として自動的に設定される。DR の場合、加速エネルギー > 1.54 GeV で運転する事はない。

表 3: 使用方法別最大定格 (リング)

| 使用方法 | SB | MB |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| 最大エネルギー (GeV) | 2.3 | ← |
| バンチ内最大粒子数 | 3×10^{10} | 2×10^{10} |
| 最大バンチ数 (pulse ⁻¹) | 1 | 20 |
| 最大繰り返し数 (Hz) | 25 | ← |
| 最大電流 (mA) | 10 | 70 |
| 最大出力 (GeV·mA)* | 15.4 | 107.8 |
| 代表的エネルギー (GeV) | 1.54 | ← |
| 代表的電流 (mA) | 10 | 70 |

* インターロックにより各モードにおける最大出力がこの値を超えないようになっている。

すなわち、シングルバンチまたはマルチバンチの場合の電流の上限が自動的に設定される。

また、リングは代表エネルギーに合わせて設計されているので、それ以上のエネルギーのビームを保持する事はできない。

5.2 使用施設の形態

1. 本発生装置は、図 5 に示すように既存のアセンブリホールの中に、コンクリートブロックにて構築される発生装置室内に設置する。コンクリートの厚さは、直線加速器部分で 1 m、リング部分で 0.5 m である。当該発生装置室の出入口は同図に示すように 6 箇所（図 5 参照）である。ただし、4 箇所は非常時の脱出口 (E1~E4) で通常施錠してある。
2. 発生装置室への出入口に汚染検査室を設置する。
3. 発生装置室内で漏れた冷却水はピット内に集め、ポンプで吸い上げた後ステンレスティール製のタンク内に溜める。
4. 管理区域の入出管理は、アセンブリホールの出入口 3 箇所（図 3 参照）で行う。
5. 発生装置室内の空調系統は、発生装置室外と遮断した閉回路の系統を設置してある。
6. 発生装置室内の冷却水系統は、閉回路の系統で設置してある。

5.3 主要構造物等

5.3.1 構造の耐火性

建築基準法に規定する耐火構造になっている。本発生装置室は普通コンクリート製であり、延焼のおそれはない。

5.3.2 材料

本発生装置室の床は鉄筋コンクリート製、壁、天井はともにコンクリートブロックにより作られている。出入口の扉は鉄製、並びにコンクリート製である。

6 放射線遮蔽計算

6.1 放射線遮蔽計算の基準

本所では放射線管理のために規定等により以下に示す管理基準に基づいて区域管理を行っている。

A) 管理区域

1. 立入禁止管理区域：空間線量率 100 mSv/h を超えるかまたはその恐れがある所
2. 立入制限管理区域：

- (a) 空間線量率 $20 \mu\text{Sv/h}$ を超えるかまたはその恐れがあり、 100mSv/h 以下の区域
 - (b) 空气中放射能濃度が告示別表第1の第5欄及び別表第2の第2欄に掲げる濃度限度の10分の1を超えるか、または表面密度が告示別表第3に掲げる表面密度限度の10分の1を超えるか、あるいは超える恐れのある区域
3. 一般管理区域 : 空間線量率が $1.5 \mu\text{Sv/h}$ (1週間平均) を超えるかまたはその恐れのある区域で、上記 (a)、(b) に該当しない区域

B) その他の区域

1. 周辺監視区域 :

- (a) 空間線量率が $0.2 \mu\text{Sv/h}$ (四半期) を超えるかまたはその恐れのある区域
- (b) 空气中放射能濃度が告示別表第1の第5欄及び別表第2の第2欄に掲げる濃度限度の10分の1以下で、かつ表面密度が告示別表第3に掲げる表面密度限度の10分の1以下の区域

2. 一般区域 : 空間線量率 $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以下の区域

3. 敷地境界における空間線量率 : 施設あたり $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下

放射線施設の新設、変更の際し、上記区域管理を行っていく上で必要となる施設の放射線遮蔽の設計基準は次の通りである。

- 1. 立入制限管理区域及び一般管理区域に係わる空間線量率は1時間あたりそれぞれ 100mSv および $20 \mu\text{Sv}$ 以下とする。
- 2. 周辺監視区域、一般区域および敷地境界に係わる空間線量率はそれぞれ1時間あたり $1.5 \mu\text{Sv}$ 、 $0.2 \mu\text{Sv}$ および1年間あたり $50 \mu\text{Sv}$ 以下とする。

なお、放射線障害防止法に定められた管理区域基準および敷地境界に係わる線量当量率はそれぞれ $300 \mu\text{Sv/週}$ 、 $250 \mu\text{Sv/3ヶ月}$ 以下でなければならない。上記の設計基準を満足すれば、管理区域境界では必ず空間線量率が $1.5 \mu\text{Sv/h}$ 以下となり法による管理区域境界に係わる規制値を十分下回る。また、敷地境界に係わる設計基準である年間 $50 \mu\text{Sv}$ 以下を満足すれば、法による敷地境界における規制値を十分下回る。

6.2 ビーム損失の推定

運転時のビーム特性並びに最大出力を表1に、使用方法別の最大定格を表2に示す。年間の加速器運転時間は最大1000時間、最大出力は $2.464 \text{GeV} \cdot \mu\text{A}$ である。後述のように各り

ニアック運転モード (L1~L3、BT、DR) に対応しリニアック最大電流値がインターロックに組み込まれている。また各リング運転モード (SB、MB) に対応しダンピングリング最大電流値もインターロックに組み込まれている。本申請書の遮蔽計算の基になるビーム損失率仮定値を表 4 に示す。(表 4 で取り上げたビーム損失点の場所は図 7 を参照。) 以下、ビームロス推定のための考察を述べる。

本加速器は従来の加速器に較べて低エミッタンスのビームをより安定に加速することを目標とした試験加速器であり、そのために次のような諸点に注意して設計した。

1. 加速器の加速管や収束系などの各構成要素は、精度よく製作された架台の上に全体として $100 \mu\text{m}$ 以下の初期精度で設置する。その後、ワイヤーを用いたアラインメント装置により、常時相対的な位置を監視し、この初期設置精度を保つ方式になっている。
2. ビーム形状モニター及びビーム位置モニターなど多くのビーム診断装置を設置し、フィードバックシステムとして働くようになっている。
3. 本加速器では、第 7 章で述べるインターロック装置を備えると共に、電子銃、クライストロン、収束系など全てを計算機制御に組み込んであり、何等かの異常が生じた場合、直ちに電子銃は停止する。

従って、本加速器のビームロスは従来の同型式の加速器に比べて少ないと考えられる。

加速ビームの損失は、バンチ内の粒子数に依存し、一般に粒子数が多くなるほどビーム損失が大きい。ここでは安全のために最大損失について遮蔽計算を行う。電子銃で発生した最大エネルギー 240 keV のパルス電子ビームはサブハーモニック・バンチャー、バンチャー内で最大 20% 失われる。この損失により最大エネルギーが 240 keV の X 線が発生する。

バンチャー以後加速管を経てビームダンプに至るビーム軌道に関しては、コンピューターシミュレーションによる解析を行い、加速管や真空チェンバーに衝突して失われないように設計されたビーム集束系をこの間に設置する。

ここでは、まず第 1 加速管部におけるビームロスを評価する。第 1 加速管におけるビームの集束はヘルムホルツ磁場内により行う。先に述べた本加速器の特徴からビーム粒子が加速管や真空チェンバー等に衝突して失われることはほとんどないと考えられるが、遮蔽計算に当たっては、「加速管内 (全長 3 m) に於て最大エネルギー 150 MeV のビームが 0.5 % 損失する」と仮定する。このビーム損失の値は従来の電子、陽電子線形加速器における仮定 (0.01 %/m) よりも更に安全サイドになっている。損失を免れて加速された電子ビームは、L1 モードでは、第 1 加速管直後の分析電磁石により曲げられて、ビームダンプ 1 で全て失われる。他の使用方法の場合には、さらに加速される。次に、 150 MeV より下流側でのビームロスの評価について述べる。

表 4: ビーム損失

| 場所 | エネルギー (GeV) | 電流 (μA) | 損失率 | リニアック 使用モード |
|----------------|----------------|-------------------------|--------------------|----------------|
| ダンプ1(D1) | 0.15 | 0.33 | 100% | L1 |
| ダンプ2(D2) | 1.54 | 1.6 | 100% | L2 |
| ダンプ3(D3) | 1.54 | 0.016 | 100% | DR |
| 移動式ダンプ(MD) | 1.54 | 1.6×10^{-3} | 100% | BT |
| ターゲット(T) | 1.54 | 1.6×10^{-4} | 100% | L3 |
| 第一加速管(L1) | 0.15 | 1.6 | 0.5% | 全モード |
| コリメータ1(C1) | 1.54 | 0.016 | 0.3% | DR, BT |
| コリメータ2(C2) | 1.54 | 0.016 | 0.3% | DR, BT |
| 取り出しキッカー2(EK2) | 1.54 | 0.016 | 0.3% | DR |
| リング偏向電磁石 | 1.54 | — | $4 \times 10^{8*}$ | DR |

* 蓄積リングにおける損失であるので、毎秒の損失電子数で表す。36台の偏向電磁石の合計。

リニアックでのビームの性質（変更なし）

当初は、エネルギーを 1.54 GeV、規格化エミッタンス ϵ_N を $3.0 \times 10^{-4} \text{m} \cdot \text{rad}$ 以下、エネルギー幅を 1% 以内、パルス当たり 20 バンチ、繰り返し 25Hz、バンチ当たりの粒子数を 2.0×10^{10} と仮定して設計を進めてきた。

しかし、パルス当たり 20 バンチのビームの性質を第 1 加速管部で測定した結果によると、80 MeV で ϵ_N は $5.0 \times 10^{-5} \text{m} \cdot \text{rad}$ 以下であった。リニアックでのエミッタンスの増加を考慮しても、今までの経験から 1.54 GeV での ϵ_N は $1.0 \times 10^{-4} \text{m} \cdot \text{rad}$ 以下にできることは明らかである。またビームのエネルギー幅に関して、20 psec (RMS⁴) のバンチ長を仮定していたが、バンチ長の測定では 5 psec (RMS) 以下であるとの結果を得ている [1]。これに基づいて、ビームエネルギーの全幅 (99%BEAM) を計算すると 1% 以下となる⁵。

以上より、規格化エミッタンス ϵ_N は $1.0 \times 10^{-4} \text{m} \cdot \text{rad}$ 以下、エネルギーの半幅 (運動量の半幅) 0.5% 以下を仮定して ATF リニアックおよびビーム輸送系におけるビームロスの評価する。

⁴Root mean square: 2乗和の平方根。

⁵バンチの各部分に対する加速エネルギーは、バンチの各部分が加速管を通過する瞬間の高周波強度に比例する。一方、高周波の強度は余弦関数的に変化し、バンチの大部分は高周波強度が最大になる瞬間に加速管を通過する。実際にはバンチ長が有限の長さを持つため、バンチの各部分に対する加速エネルギーは分布を持つ。このため、バンチ長が長いほどエネルギー幅が広がる。

リニアックにおけるビームロスの評価 (150 MeV より下流側、変更なし)

この部分におけるビームの集束系は、任意の場所において $\sqrt{7 \times 10^{-3} \beta / \gamma} < r$ が成り立つように設計してきた。但し、 β はビームの広がりに関するパラメータ、 γ は相対論的因子 (ビームエネルギーが 1.54 GeV の時には、3000)、 r はその場所における真空パイプの内径である。ビームサイズは、 $\sigma = \sqrt{\epsilon_n \beta / \gamma} = \sqrt{1 \times 10^{-4} \beta / \gamma}$ で与えられるので、真空パイプ内径とビームサイズの比 R をとると、

$$R = r / \sigma > \frac{\sqrt{7 \times 10^{-3} \beta / \gamma}}{\sqrt{1 \times 10^{-4} \beta / \gamma}} \simeq 8.37$$

となる。従って、ビームサイズは真空パイプの内径に比べて十分小さく、この部分におけるビームのロスは無視できると考えられる。

ビーム輸送系およびビーム取り出し系におけるビームロスの評価

ビームロスはビーム輸送路に設けられたコリメータ部 (コリメータ 1 および 2) およびビーム取り出し路に設けられた取り出しキッカー 2 でのみ生じる。(図 7 参照) その他の部分は真空ダクトの内径が 24 mm あり、定常運転においてはビームロスなくビーム輸送できる。コリメータ部の形状は真空ダクトの内径が 14 mm で長さ 226.7 mm、材質は SUS である。コリメータは最初の偏向電磁石の直後の Q-Magnet の中に設置する。

コリメータ 1 でのビームサイズはエンベロープ関数 $\beta=10$ m、ディスパージョン $\eta=0.3$ m である。 β と η は共にビームの広がりを表すための関数である。ビームの幾何的な広がりがガウス分布で表されると仮定する。ビームの広がり σ は、 β からの寄与と η からの寄与の和で得られる。ここでは、 3σ に相当するビームの広がり的大小さを評価する。

$$\begin{aligned} 3\sigma &= \sqrt{\left(3\sqrt{\beta\epsilon_N/\gamma}\right)^2 + (\eta\Delta p/p)^2} \\ &= \sqrt{9\beta\epsilon_N/\gamma + (\eta\Delta p/p)^2} \end{aligned}$$

である。ここで、先に得た運動量の半幅 $\Delta p/p = 0.5\%$ は、99%以上のビームがこの中に含まれる値であり、ガウス分布の 3σ に相当するので、上式の右辺第 2 項は 3 倍していない。上記の値を代入すると、

$$\begin{aligned} 3\sigma &= \sqrt{3.03 + 2.25} \\ &= 2.3 \text{ mm} \end{aligned}$$

を得る。ビーム軌道及び真空ダクトのずれの和は ± 2 mm 以内にできるので、ビームの 3σ 以下の部分が失われることはなく、 3σ 以上の部分の一部分が失われる。ここでは、ビームの 3σ 以上の部分 (0.27%以内) が失われると考え、コリメータ 1 でのビームロスは 0.3% とする。コリメータ 1 の効果のため、コリメータ 2 に入射するビームのサイズはコリメータ 1 に入射

するビームのサイズよりも小さい。このため、コリメータ2におけるビームロスコリメータ1におけるビームロスに比べて少ないと考えられる。しかし、計算単純化のため、安全側の単純化を行い、コリメータ2でのビームロスも0.3%とする。

取り出しキッカー2でのビームサイズはコリメータ部でのビームサイズより小さく、取り出しキッカー2でのビーム損失はコリメータ部での損失より少ないと考えられる。しかし、ここでは取り出しキッカー2でのビーム損失も0.3%と仮定する。

ダンピングリングのビームの性質

リングに入射されるビームはビーム輸送路と同じものであるため、規格化エミッタンスは $1.0 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{rad}$ 以下、エネルギー幅は1%以下を仮定する。リングをビームが周回している間に規格化エミッタンスは $3 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{rad}$ まで減衰していく。このときの減衰時間は約5 msである。入射から約200 ms後、エミッタンスが小さくなったビームはリングから取り出され、ビーム取り出し路に送られる。この時のビームサイズは 3σ で0.5 mm以下となる。

ダンピングリングでのビームロスの評価

次にダンピングリングでのビーム損失を推定する。リングの真空ダクトの内径はビーム輸送路と同じ24mmであるため定常運転においてこれによるロスはない。リングではビーム寿命によるビームロスを考慮する。ビーム寿命には Touscheck 効果⁶[2] によるものと残留ガスとの散乱によるものがあるが、後者はビームのリング滞在時間（1秒以下）に対して数時間オーダーなので無視してよく、ここでは Touscheck 効果による寿命で評価する。

$$\begin{aligned}
 N_{loss} &= \frac{f_{rep}}{N_T} \times N_e \times N_b N_T \times \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{N_T}{\tau f_{rep}}\right) \right\} \\
 &\simeq \frac{f_{rep}}{N_T} \times N_e \times N_b \times N_T \times \frac{N_T}{\tau f_{rep}} \\
 &= \frac{N_e N_b N_T}{\tau}
 \end{aligned} \tag{3}$$

ここで、 f_{rep} はリニアックからの入射の繰り返し数、 N_e はバンチあたりの電子数、 N_b はトレインあたりのバンチ数、 N_T はリング一周に滞在するトレイン数、 τ は Touscheck 効果によるビーム寿命である。式3で $N_e N_b N_T$ はリングを周回している電子数であるから、リングでのロスは、リング周回電子数を Touscheck 寿命で割る事で得られる。また、Touscheck 寿命は近似的には、 N_e の逆数に比例すると予想している。図8にシミュレーション計算によって得た Touscheck 寿命の N_e 依存を示す。ダンピングリングでの最大電流値は単バンチモードで10 mA、マルチバンチモードで70 mAである。このときの Touscheck 効果によるビー

⁶バンチ内の電子同士のクーロン散乱(Møller散乱)により電子の持っている横方向の運動量が縦方向に変換されることで、電子が安定領域を越え失われる現象。

表 5: リングにおけるビーム損失率

| | Nt | rep rate | Nb | Ne | tau(sec) | Nloss(1/s) | current(A) |
|----|----|----------|----|---------|----------|------------|------------|
| 0 | | | | 0.0e+00 | | 0.00e+00 | 0.000 |
| 1 | 5 | 25.00 | 10 | 1.0e+09 | 2000 | 2.50e+07 | 0.017 |
| 2 | 5 | 25.00 | 10 | 2.0e+09 | 1000 | 1.00e+08 | 0.035 |
| 3 | 5 | 25.00 | 10 | 3.0e+09 | 700 | 2.14e+08 | 0.052 |
| 4 | 5 | 25.00 | 10 | 4.0e+09 | 500 | 4.00e+08 | 0.069 |
| 5 | 5 | 25.00 | 10 | 5.0e+09 | 450 | 5.55e+08 | △ 0.087 |
| 6 | 5 | 25.00 | 10 | 7.0e+09 | 300 | 1.17e+09 | △ 0.121 |
| 7 | 5 | 25.00 | 10 | 1.0e+10 | 250 | 2.00e+09 | △ 0.173 |
| 8 | | | | | | | |
| 9 | | | | 0.0e+00 | | 0.00e+00 | 0.000 |
| 10 | 3 | 25.00 | 20 | 1.0e+09 | 2000 | 3.00e+07 | 0.021 |
| 11 | 3 | 25.00 | 20 | 2.0e+09 | 1000 | 1.20e+08 | 0.042 |
| 12 | 3 | 25.00 | 20 | 3.0e+09 | 700 | 2.57e+08 | 0.062 |
| 13 | 3 | 25.00 | 20 | 4.0e+09 | 500 | 4.80e+08 | △ 0.083 |
| 14 | 3 | 25.00 | 20 | 5.0e+09 | 450 | 6.67e+08 | △ 0.104 |
| 15 | 3 | 25.00 | 20 | 7.0e+09 | 300 | 1.40e+09 | △ 0.145 |
| 16 | 3 | 25.00 | 20 | 1.0e+10 | 250 | 2.40e+09 | △ 0.208 |
| 17 | | | | | | | |
| 18 | | | | 0.0e+00 | | 0.00e+00 | 0.000 |
| 19 | 2 | 25.00 | 20 | 1.0e+09 | 2000 | 2.00e+07 | 0.014 |
| 20 | 2 | 25.00 | 20 | 2.0e+09 | 1000 | 8.00e+07 | 0.028 |
| 21 | 2 | 25.00 | 20 | 3.0e+09 | 700 | 1.71e+08 | 0.042 |
| 22 | 2 | 25.00 | 20 | 4.0e+09 | 500 | 3.20e+08 | 0.055 |
| 23 | 2 | 25.00 | 20 | 5.0e+09 | 450 | 4.44e+08 | △ 0.069 |
| 24 | 2 | 25.00 | 20 | 7.0e+09 | 300 | 9.33e+08 | △ 0.097 |
| 25 | 2 | 25.00 | 20 | 1.0e+10 | 250 | 1.60e+09 | △ 0.139 |
| 26 | | | | | | | |
| 27 | | | | 0.0e+00 | | 0.00e+00 | 0.000 |
| 28 | 1 | 25.00 | 20 | 2.0e+09 | 1000 | 4.00e+07 | 0.014 |
| 29 | 1 | 25.00 | 20 | 3.0e+09 | 700 | 8.57e+07 | 0.021 |
| 30 | 1 | 25.00 | 20 | 4.0e+09 | 500 | 1.60e+08 | 0.028 |
| 31 | 1 | 25.00 | 20 | 5.0e+09 | 450 | 2.22e+08 | 0.035 |
| 32 | 1 | 25.00 | 20 | 7.0e+09 | 300 | 4.67e+08 | △ 0.048 |
| 33 | 1 | 25.00 | 20 | 1.0e+10 | 250 | 8.00e+08 | △ 0.069 |
| 34 | 1 | 25.00 | 20 | 2.0e+10 | 115 | 3.48e+09 | △ 0.139 |
| 35 | | | | | | | |
| 36 | | | | 0.0e+00 | | 0.00e+00 | 0.000 |
| 37 | 1 | 25.00 | 1 | 2.0e+09 | 1000 | 2.00e+06 | 0.001 |
| 38 | 1 | 25.00 | 1 | 3.0e+09 | 700 | 4.29e+06 | 0.001 |
| 39 | 1 | 25.00 | 1 | 4.0e+09 | 500 | 8.00e+06 | 0.001 |
| 40 | 1 | 25.00 | 1 | 5.0e+09 | 450 | 1.11e+07 | 0.002 |
| 41 | 1 | 25.00 | 1 | 7.0e+09 | 300 | 2.33e+07 | 0.002 |
| 42 | 1 | 25.00 | 1 | 1.0e+10 | 250 | 4.00e+07 | 0.003 |
| 43 | 1 | 25.00 | 1 | 2.0e+10 | 115 | 1.74e+08 | 0.007 |
| 44 | 1 | 25.00 | 1 | 3.0e+10 | 115 | 2.61e+08 | 0.010 |
| 45 | | | | | | | |
| 46 | 1 | 25.00 | 1 | 3.0e+10 | 115 | 2.61e+08 | 0.010 |
| 47 | 1 | 12.50 | 1 | 3.0e+10 | 115 | 2.61e+08 | 0.010 |
| 48 | 1 | 6.25 | 1 | 3.0e+10 | 115 | 2.61e+08 | 0.010 |
| 49 | 1 | 3.12 | 1 | 3.0e+10 | 115 | 2.61e+08 | 0.010 |
| 50 | 1 | 1.56 | 1 | 3.0e+10 | 115 | 2.60e+08 | 0.010 |
| 51 | 1 | 0.78 | 1 | 3.0e+10 | 115 | 2.59e+08 | 0.010 |

表中で電流に△記号を付けた組み合わせでは、最大電流を超えるので運転を行わない。
 これ以外の場合にはすべてビーム損失が 4×10^8 (electron/s) を下回っている。

ムロスが1秒間あたり 4.0×10^8 個以下となるように N_e を選択して運転する。参考のため、表 5 に N_e などを変えた時のビーム損失率を示す。

6.3 計算方法

6.3.1 バルク遮蔽

中性子 Jenkins [3] が導いた点状線源に対する次の計算式を使用する。

$$H_n = 2E_0 \left(\frac{\sin \theta}{r} \right)^2 \times \left\{ H_0(\text{high}) \exp \left(\frac{-d}{\lambda_1 \sin \theta} \right) (1 - 0.72 \cos \theta)^{-2} + H_0(\text{mid}) \exp \left(\frac{-d}{\lambda_3 \sin \theta} \right) (1 - 0.75 \cos \theta)^{-1} + 3.79 Z^{0.73} \exp \left(\frac{-d}{\lambda_2 \sin \theta} \right) \right\} \quad (4)$$

H_n : 中性子の線量当量 (Sv/e)

E_0 : 電子ビームエネルギー (GeV)

r : ターゲットから遮蔽表面までの距離 (m)

θ : ターゲットから対象となる位置を見込む角

$H_0(\text{high})$: 100 MeV 以上の中性子線源項

d : 遮蔽の厚さ (g/cm^2)

λ_1 : 高エネルギー中性子の減弱距離、コンクリート $120 \text{ g}/\text{cm}^2$

$H_0(\text{mid})$: 中間エネルギー (25~100 MeV) の中性子線源項

λ_3 : 中間エネルギー中性子の減弱距離、コンクリート $55 \text{ g}/\text{cm}^2$

λ_2 : 巨大共鳴中性子の減弱距離、コンクリート $30 \text{ g}/\text{cm}^2$

Z : ターゲットの原子番号

図 9 に高エネルギーおよび中間エネルギーの中性子線源項を電子エネルギーの関数で示す。

(4) 式右辺先頭の因子 2 は昭和 63 年 10 月 1 日付行政通達 (63 安局第 153 号) に基づき中性子の線質係数を 2 倍にすることを示す。この式は前方方向には適用できないが、Alsmiller 等 [4] によって 400 MeV 電子の場合、遮蔽体中の線量当量は前方方向で 90 度方向の約 2 倍であるという結果が出されているので、前方方向の計算は 90 度方向の結果を 2 倍したものを使用する。

コンクリート以外の物質の $\lambda_1 \sim \lambda_3$ については、

$$\lambda_1(A) = 38A^{0.33} \quad (5)$$

$$\lambda_2(A) = 4.8A^{0.58} \quad (6)$$

$$\lambda_3(A) = 8.9A^{0.58} \quad (7)$$

から計算した値を使用する。(A: 遮蔽体の質量数)

横方向ガンマ線 Jenkins [3] が導いた点状線源に対する次の計算式を使用する。

$$H_{\gamma} = E_0 \left(\frac{\sin \theta}{r} \right)^2 \times \left\{ 1.33 \times 10^{-11} \exp \left(\frac{-\mu d}{\rho \sin \theta} \right) (1 - 0.98 \cos \theta)^{-1.2} \right. \\ \left. + 0.267 H_0(\text{high}) \exp \left(\frac{-d}{\lambda_1 \sin \theta} \right) (1 - 0.72 \cos \theta)^{-2} \right\} \quad (8)$$

H_{γ} : ガンマ線線量当量 (Sv/e)

μ : 全断面積が最小となるエネルギーでの線減弱係数 (cm^{-1})
 コンクリート 0.055、鉛 0.47、鉄 0.23、銅 0.275

ρ : 各物質の密度

線状に一樣なビーム損失が起こる場合には、ビーム損失の生じる領域の長さ l が r に較べて十分大きい場合に成立する次式を使用する。

$$H_l = \frac{r}{l} \cdot H_m \quad (9)$$

H_l : l の領域に一樣なビーム損失がある場合の線量率

H_m : ビーム損失が点状に集められて発生したと仮定して求められた線量率

前方ガンマ線 前方方向については、Sakano 等 [5] が提唱している線源項を使用して

$$H_{\gamma} = H_0 D^{-2} \left(\frac{E_0}{100} \right)^2 \exp(-0.055 \times 11.35 \times d_{pb} - \mu d) \quad (10)$$

H_{γ} : ガンマ線線量当量 (Sv/e)

H_0 : 1.0×10^{-12} (Sv/e) ($E_0 > 200$ MeV)、 4.0×10^{-13} (Sv/e) ($E_0 < 200$ MeV)

E_0 : MeV 単位の電子ビームのエネルギー、

a : 1.47 ($E_0 > 200$ MeV)、2.62 ($E_0 < 200$ MeV)

D : ターゲットから遮蔽表面までの距離 (m)

d_{pb} : ターゲットとコンクリートの間の鉛厚さ (cm)

μd : コンクリート等の鉛以外の遮蔽体の減衰係数と厚さの積により評価する。

6.3.2 迷路の遮蔽効果

リニアック部分の非常口は迷路構造となっている。迷路の入口に遮蔽扉があるので評価は簡単ではないが、安全の為に中性子、ガンマ線とも遮蔽扉に垂直に入射すると仮定してもとめた線源強度を使用して評価する。

中性子 Tesch [6] が導いた次の式を使用する。線源強度としては、迷路入口の線量当量の2倍を使用する。迷路による減衰効果 ($f(l)$) は、

$$f(l) = \frac{1}{1 + 0.22A^{1.3}} \left\{ \exp \left(\frac{-l}{0.45} \right) + 0.22A^{1.3} \cdot \exp \left(\frac{-l}{2.35} \right) \right\} \quad (11)$$

A:迷路の断面積 (m²)

l :迷路の長さ (m)

により評価する。

ガンマ線 Tesch [7] が種々の大きさの実際の迷路で測定した結果から得た次の式を使用して評価する。

$$f(l) = 3.4(1.5 + l)^{-3.0} \quad (12)$$

6.3.3 ダクトストリーミング

ダクトストリーミングの評価は次式を使用する。

中性子 ダクトによる減衰が $(a/2z)^2$ に比例するとして

$$H_n = \left(\frac{a}{2z}\right)^2 H(0) \quad (13)$$

$H(0)$: ダクト入口の線量当量

a : ダクトの実効直径

z : ダクトの長さ

により評価する。

ガンマ線 Tesch [7] が円筒ダクトについて実測値から導いた

$$H_\gamma = H(0) \left\{ 0.8 \exp\left(-\frac{1.5z}{a}\right) + 2.8 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{0.12z}{a}\right) \right\} \quad (14)$$

により評価する。

6.3.4 敷地境界における年間線量

スカイシャインに関する Thomas の式 [8]

$$\Phi(R) = \frac{1}{4\pi R^2} B_0 Q \exp\left(-\frac{R}{\lambda_{air}}\right) \quad (15)$$

$\Phi(R)$: スカイシャインによる中性子束 (n/sec/m²)

R : 線源からの距離 (m)

B_0 : ビルドアップ係数、2.8

Q : スカイシャイン計算に用いる点線源の強度 (n/sec)

λ_{air} : 高エネルギー中性子に対する空気の平均自由行程、850 m
を用いる。

$$Q = \pi\left(\frac{r}{2}\right)^2 \Phi_{max} \quad (16)$$

r : ビームラインから遮蔽表面までの距離 (m)

Φ_{max} : 遮蔽表面の最大中性子束 (n/sec/m²)

により近似的に Q を求めて、(15) 式に代入すると、

$$\Phi(R) = \frac{B_0}{16} \Phi_{max} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \exp \left(-\frac{R}{\lambda_{air}} \right) \quad (17)$$

となる。スカイシャインの過程で中性子のエネルギースペクトルが大きくは変わらないとすると、中性子束に関するスカイシャインの式である (17) 式を線量当量に関するスカイシャインの式に変換する事ができる。

$$H(R) = \frac{B_0}{16} H_{max} h \left(\frac{r}{R} \right)^2 \exp \left(-\frac{R}{\lambda_{air}} \right) \quad (18)$$

$H(R)$: 線源から距離 R だけ離れた点における年間線量当量

H_{max} : 遮蔽表面での最大線量当量率

h : 年間の運転時間

(18) 式を敷地境界における年間線量当量の評価に用いる。

6.4 遮蔽計算結果 I (管理区域内)

最初に遮蔽壁の計算を行い、次に遮蔽の欠損部 (空調ダクト、扉、非常用扉) の遮蔽計算を行った。以下に示すように管理区域での空間線量は、本所の一般管理区域の基準 (20 μ Sv/h 以下) を満足している。表 4 に示したビーム損失に対応する、遮蔽壁外側での空間線量計算結果を表 6 に示す。

6.4.1 遮蔽壁外側

ダンプ近傍 ダンプ 1、2、3 および移動式ダンプから最も近い遮蔽壁外側の点での空間線量を (4)~(9) 式により計算した。遮蔽および計算結果を表 6 に示す。空間線量率は最大 15.9 μ Sv/h であり、一般管理区域の基準を満足している。なお人が常時立入る管理区域に係る規制値 (作業員の被曝線量が 1 mSv/週を超えないこと) に対しても、作業時間が週あたり 44 時間であるので 700 μ Sv/週となり規制値を下まわっている。

第 1 加速管・コリメータおよびキッカー近傍 前節に述べたように、加速管でのビーム損失は第 1 加速管出口で 0.5 %、コリメータ 1 および 2 でそれぞれ 0.3 %、取り出しキッカーで 0.3 % と仮定している。遮蔽および (4)、(8) 式による遮蔽壁外側での空間線量率を、表 6 に示す。遮蔽壁外側での空間線量率は最大で 16.8 μ Sv/h であり、一般管理区域の基準を満足している。

表 6: 遮蔽効果 (管理区域内線量率)

| 場所 | | 距離 (m) | 外壁 | ダンプ | | 補助遮蔽 | | 空間 線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) |
|-----------------------|-------|-----------|-------------|----------|----------|----------|----------|-----------------------------------|
| | | | コンクリ (m) | 鉛 (m) | 銅 (m) | 鉄 (m) | 鉛 (m) | |
| ダンプ1(D1) | (側面) | 2.0 | 1.0 | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 15.9 |
| | (上部) | 2.8 | 1.0 | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 8.1 |
| ダンプ2(D2) | (前方) | 3.5 | 2.0 | 0.2 | 0.25 | 1.0 | 0.0 | 2.3 |
| | (側面) | 2.7 | 1.0 | 0.2 | 0.05 | 1.335 | 0.0 | 7.9 |
| | (上部) | 2.8 | 1.0 | 0.2 | 0.05 | 1.24 | 0.0 | 11.8 |
| ターゲット (T) | (側面) | 2.7 | 1.0 | 0.05 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.6 |
| | (上部) | 2.8 | 1.0 | 0.05 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.3 |
| 第1加速管 (L1) | (北側面) | 2.7 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.01 | 16.8 |
| | (南側面) | 2.8 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.05 | 3.6 |
| | (上部) | 2.8 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.01 | 15.6 |
| コリメータ1(C1) | (前方) | 12.0 | 2.8 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.15 | 0.30 |
| | (側面) | 2.8 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.76 |
| | (上部) | 2.8 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.76 |
| ダンプ3(D3) | (前方) | 1.75 | 0.5 | 0.0 | 0.25 | 1.0 | 0.0 | 5.0 |
| | (側面) | 6.2 | 0.5 | 0.0 | 0.05 | 1.0 | 0.0 | 0.65 |
| | (上部) | 2.3 | 0.5 | 0.0 | 0.05 | 1.0 | 0.0 | 4.7 |
| 移動式ダンプ (MD) | (前方) | 36.0 | 1.0 | 0.0 | 0.25 | 0.0 | 0.1 | 0.20 |
| | (側面) | 3.6 | 1.0 | 0.0 | 0.05 | 0.15 | 0.0 | 7.1 |
| | (上部) | 2.8 | 0.5 | 0.0 | 0.05 | 0.40 | 0.0 | 14.7 |
| コリメータ2(C2) | (前方) | 38.5 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.35 | 0.0 | 0.27 |
| | (側面) | 4.1 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 2.9 |
| | (上部) | 2.3 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 17.1 |
| 取り出しキッカー 電磁石 (EK2) | (前方) | 20.6 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.35 | 0.0 | 0.94 |
| | (側面) | 7.2 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.96 |
| | (上部) | 2.3 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 17.1 |
| リング偏向 電磁石 | (前方) | 7.2 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.15 | 0.36 |
| | (側面) | 1.7 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.49 |
| | (上部) | 2.3 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.44 |

注1) この表においては、昭和63年10月1日付行政通達(63安局第153号)に基づき、中性子の線質係数を2倍にした線量当量を示している。

注2) ダンプ1からコリメータ1まではリニアック室内、ダンプ3からリング偏向電磁石まではダンピングリング室内でのビーム損失である。

注3) リング偏向電磁石については、前方の計算では1台当たりのビーム損失を用い、側方および上方の計算では、2.4 m毎に電磁石があるとして線源近似を用いた。

前方・側面とも、磁石と遮蔽壁が最も近いダンピングリング西側遮蔽壁での評価である。

ターゲット近傍 L3モードで使用する中性子発生用ターゲットからの空間線量率は、表 6 に示すように、遮蔽壁外側で、 $3.6 \mu\text{Sv/h}$ (側面) および $3.3 \mu\text{Sv/h}$ (上部) であり、一般管理区域の基準を満足している。コンクリート遮蔽の中性子ターゲットの真上の部分に TOF 測定用の直径 15 cm の貫通孔をあける。この貫通孔には、通常はコンクリート 1 m と等価な鉄栓を設置する。また、実験中には筒 (直径 30 cm、高さ 180 cm) を貫通孔上に立て、人の接近を禁止する。そして、安全のためこの鉄栓と筒の移動にはリニアック室パーソナルキー (図 21 参照) の使用が必要な構造とする。仮に、この鉄栓と筒がない状態で、中性子発生用ターゲットを設置して L3モードの運転を行った場合、貫通孔出口での空間線量は 1.7 mSv/h となる。これは本所の立入制限管理区域に相当する。

リング偏向電磁石付近 リング運転時には、リングの全偏向電磁石 (36 台) において、最大 4.0×10^8 (電子/秒) の損失があると仮定している。この損失による遮蔽壁外側での線量率は表 6 に示すように最大で $0.49 \mu\text{Sv/h}$ であり、一般管理区域の基準を満足している。なお、リング偏向電磁石については、前方の計算では 1 台当たりのビーム損失を用い、側方および上方の計算では、2.4 m 毎に電磁石があるとして線源近似を用いた。前方・側面とも、磁石と遮蔽壁が最も近いダンピングリング西側遮蔽壁での評価である。(線量評価点は図 14 内に△記号で示す。)

複数の損失点からの線量率の合算 リニアックまたはリング運転時には複数のビーム損失点があり、遮蔽壁外側での線量についても最寄りの損失点以外の損失点からの寄与も存在する。しかし、最寄りの損失点と評価点の距離が近いため、それ以外の損失点からの寄与は微量であり無視できる。(管理区域境界での線量計算ではこの合算が必要である。)

6.4.2 出入口

リニアック室出入口には鉄製ドア (15 cm 厚) が設置されている (図 5)。このドアの外側の線量に最も寄与するのは、第 1 加速管での 150 MeV ビームの 0.5% ロスにより発生する中性子とガンマ線である。このビームロスによるドア内側での線量は、中性子が $45 \mu\text{Sv/h}$ 、ガンマ線が $3.78 \mu\text{Sv/h}$ である。ここで、中性子およびガンマ線が扉に斜めに入射することによる減衰を考慮して、線量を 0.29 倍する。そして、これらがドアに垂直に入射するとして減衰を計算し、ドア外側での線量を求めると中性子が $13.1 \mu\text{Sv/h}$ 、ガンマ線が $1.1 \mu\text{Sv/h}$ 、合計 $14.2 \mu\text{Sv/h}$ となる。従って出入口のドア外側での空間線量は、一般管理区域の基準を満足している。

DR 室の出入口の扉 (場所は図 5 の「DR 室遮蔽扉」を参照) は厚さ 55 cm のコンクリート製であり、コンクリート遮蔽壁 (50 cm) と同等の遮蔽能力があるため、その主要部は、遮

蔽欠損部に該当しない(図 10参照)。一方、扉とコンクリート壁の接合部のコンクリート最小厚さは 16 cm であり、この部分の遮蔽能力は、扉の主要部の遮蔽能力より低い。そこで、最寄りのリング偏向電磁石で発生した中性子とガンマ線が電磁石を構成する鉄 10 cm を透過した後この接合部に入射すると仮定して、接合部外側での空間線量率を求めると 0.47 $\mu\text{Sv/h}$ となる(最寄りのリング偏向電磁石から DR 室出入口までの直線距離は 4.9 m)。

6.4.3 非常口

リニアック室には、2ヶ所の非常口があり、外部が迷路構造となっている。まず、上流側の非常口(E1)での空間線量を評価する。最も寄与の大きい線源は、ダンプ1である。ダンプ1からE1までの距離(32.4 m)を考慮してE1入口での線量を求めると、4.6 $\mu\text{Sv/h}$ となる。E1出口での線量はこれよりも低く、一般管理区域基準以下である。

次に、下流側の非常口(E2)での空間線量を評価する。この場合最も寄与の大きい線源は、中性子発生用ターゲットである。ターゲットからE2入口までの距離(7.8 m)を用いてE2入口での線量を求めると、中性子が 40.2 $\mu\text{Sv/h}$ 、ガンマ線が 25 $\mu\text{Sv/h}$ となる。放射線の進行方向とE2入口面のなす角度を考慮して、入口での線量を 0.23 倍する。迷路による減衰は、(11)式と(12)式を用いて、中性子に対して 0.017 倍、ガンマ線に対して 0.012 倍である。これらを乗ずるとE2出口での線量は、中性子が 0.16 $\mu\text{Sv/h}$ でありガンマ線が 0.068 $\mu\text{Sv/h}$ 、合計 0.23 $\mu\text{Sv/h}$ 。従ってE2出口での空間線量は、一般管理区域基準以下となる

DR 室には 2ヶ所の非常口がある。その位置は、リング内側(E3)およびリング外側(E4)である。非常口の扉は DR 室出入口扉と同一構造の厚さ 55 cm のコンクリート製であり、コンクリート遮蔽壁(50 cm)と同等の遮蔽能力があるため、扉の主要部は遮蔽欠損部に該当しない(図 10 参照)。一方、扉とコンクリート壁の接合部のコンクリート最小厚さは 16 cm であり、この部分の遮蔽能力は、扉の主要部の遮蔽能力より低い。E3 については、可動式ダンプ(MD)に近い図 11 に示すようにコンクリート透過厚さが 55 cm 以上となる様な遮蔽補強を行う。MD で 102° 方向に発生した中性子とガンマ線がダンプ(銅 5 cm)と MD 補助遮蔽(鉄 15 cm)透過後この接合部の最小厚さ方向に入射すると仮定して、接合部外側での空間線量を求めた。線量は、16.9 $\mu\text{Sv/h}$ (E3)であり本所の基準を満足している。

E4 については、リング偏向電磁石で発生した前方ガンマ線と横方向中性子がこの接合部の最小厚さ方向に入射すると仮定して、接合部外側での空間線量を求めた。線量は、0.62 $\mu\text{Sv/h}$ (E3)であり本所の基準を満足している。

6.4.4 空調ダクト出口

図 12 に示すように空調ダクトがコンクリートシールドに水平に開けられている。なお、図 12 はリニアック室上流部の両側面、上面および上流側の面の図である。コンクリート

シールドの外部からダクトを通して線源となる加速管が直接見通せないように、加速管の高さが 1.2 m に対して、ダクトの高さを 0.25 m にしてある。いまビームロスとして加速管での 0.5 % の電子損失を仮定する。損失点は第 1 加速管出口とする。第一加速管で失われる電子数 N_e (electron/sec) は、L2 モードで運転されている場合には

$$N_e = 1.6 \times 10^{-6}(\text{A}) \times 0.5\% / 1.6 \times 10^{-19}(\text{C/electron}) = 5.0 \times 10^{10}$$

ビーム損失点からスリット入口までの距離は 4.0 m である。スリット入口での中性子線量 $H_n(0)$ 及びガンマ線線量 $H_\gamma(0)$ は (4) 式 ~ (9) 式により計算され、 $H_n(0)=905 \mu\text{Sv/h}$ 、 $H_\gamma(0)=265 \mu\text{Sv/h}$ となる。ここで、ビームロス点からスリット入口面を見た場合にスリット入口面が斜めになり実効的な入口の面積が小さくなる効果を考慮し、スリット入口での線量を 0.45 倍する。ダクトの実効直径 a が 0.2 m、長さ z がコンクリートシールドの厚さ 1 m である。ダクト出口での中性子線量 H_n とガンマ線線量 H_γ はこれらの値を (13) 式、(14) 式に代入し、 $H_n=16.3 \mu\text{Sv/h}$ 、 $H_\gamma=0.23 \mu\text{Sv/h}$ となる。

従って、ダクト出口での中性子並びにガンマ線による線量当量率は合計 $16.5 \mu\text{Sv/h}$ となり一般管理区域の基準を満足する。他の加速管でのビームロスは無いと仮定している。またダンプからの中性子によるダクト出口線量への寄与は、ダンプ内で巨大共鳴中性子がほとんど減衰してしまうためここで見積った線量よりも小さい。また、バンチャー内でのビーム損失によるガンマ線による線量も無視できる。

ダンピングリング室コンクリートシールドにもリニアック室コンクリートシールドのダクトと同じ大きさのダクトが同じ高さに開けられている。リング偏向電磁石から遮蔽壁外側までの最短距離は 1.7 m であり、遮蔽壁の厚さは 50 cm であるので、リング偏向電磁石からダクト入口までの距離を 1.2 m とする。リング偏向電磁石で発生した中性子とガンマ線が鉛遮蔽 (10 cm) 透過後、1.2 m 離れたダクト入口に垂直に入射するとして、そこでの線量率を求めると中性子線量 $H_n=16.8 \mu\text{Sv/h}$ およびガンマ線線量 $H_\gamma = 0.64 \mu\text{Sv/h}$ となる。次に直径 20 cm、長さ 50 cm のダクトでの中性子とガンマ線の減衰を式 13 および 14 で見積もるとそれぞれ 0.04 および 0.021 となる。従ってダクト出口での線量率は、

$$H = 16.8 \times 0.04 + 0.64 \times 0.021 = 0.69(\mu\text{Sv/h})$$

となり、一般管理区域の基準を満足する。

6.5 遮蔽計算結果 II (管理区域境界および敷地境界)

6.5.1 管理区域境界

管理区域境界における各損失点からの線量率を表 7 に、各損失点から管理区域境界までの距離を図 13 および 14 に示す。

表 7: 管理区域境界での各損失点からの空間線量率

| 場所 | | 距離 (m) | 外壁 | ダンプ | | 補助遮蔽 | | 空間 線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) |
|------------|--------|-----------|-------------|----------|----------|----------|----------|-----------------------------------|
| | | | コンクリ (m) | 鉛 (m) | 銅 (m) | 鉄 (m) | 鉛 (m) | |
| ダンプ1(D1) | (側面) | 19.0 | 1.0 | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.18 |
| ダンプ2(D2) | (前方) | 18.3 | 2.0 | 0.2 | 0.25 | 1.0 | 0.0 | 0.084 |
| | (側面) | 17.5 | 1.0 | 0.2 | 0.05 | 1.335 | 0.0 | 0.19 |
| ターゲット(T) | (側面) | 17.5 | 1.0 | 0.05 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.086 |
| 第1加速管(L1) | (側面) | 21.7 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.05 | 0.059 |
| コリメータ1(C1) | (前方) | 35.1 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.15 | 0.037 |
| | (側面) | 17.5 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.020 |
| ダンプ3(D3) | (前方) | 61.8 | 0.5 | 0.0 | 0.25 | 1.0 | 0.0 | 0.0040 |
| | (側面) | 23.9 | 0.5 | 0.0 | 0.05 | 1.0 | 0.0 | 0.043 |
| 移動式ダンプ(MD) | (前方) | 104.4 | 1.0 | 0.0 | 0.25 | 0.0 | 0.1 | 0.024 |
| | (側面) | 28.8 | 1.0 | 0.0 | 0.05 | 0.15 | 0.0 | 0.11 |
| コリメータ2(C2) | (前方) | 104.4 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.35 | 0.0 | 0.037 |
| | (側面) | 28.8 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.059 |
| 取り出しキッカー | (前方) | 81.2 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.35 | 0.0 | 0.061 |
| 電磁石(EK2) | (側面) | 24.3 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.083 |
| リング偏向 | (前方・東) | 29.4 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.15 | 0.021 |
| 電磁石 | (前方・北) | 57.5 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.15 | 0.0056 |
| | (前方・西) | 74.1 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.15 | 0.0033 |
| | (側面・東) | 19.1 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.043 |
| | (側面・北) | 27.1 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.030 |
| | (側面・西) | 60.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.014 |

注1) この表においては、昭和63年10月1日付行政通達(63安局第153号)に基づき、中性子の線質係数を2倍にした線量当量を示している。

注2) ダンプ1からコリメータ1まではリニアック室内、ダンプ3からリング偏向電磁石まではダンピングリング室内でのビーム損失である。

注3) リング偏向電磁石については、前方の計算では1台当たりのビーム損失を用い、側面の計算では、2.4 m毎に電磁石があるとして線源近似を用いた。

注4) リング偏向電磁石の東・北・西はそれぞれアッセンブリーホールの東・北・西側管理区域境界を示す。

リングを使用しない場合、線源は各ダンプ・加速管およびターゲット等のビーム損失である。各損失点からの線量率を図 15 に示す。管理区域境界で最も空間線量率が高くなるのは、L2モードの場合のダンプの南15 mの点（図 15 中のD点）である。同点での空間線量率は0.20 ($\mu\text{Sv/h}$)であり、本所規程による一般区域の基準(0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 以下)を満足するとともに法による規制値 ($300 \mu\text{Sv/w} = 1.78 \mu\text{Sv/h}$)を十分下回る。

ダンピングリングモードの場合、線源は第1加速管・コリメータ1、2、リング偏向電磁石、取り出しキッカー2そしてダンプ3である。複数の線源からの放射線が管理区域境界での線量率に同じ様な寄与をするのでそれらを合算する事が必要である。各損失点からの線量率の合計を図 16 に示す。この場合、管理区域境界で最も空間線量率が高くなるのは、管理区域北東部（図 16 中のK点付近）である。同点での空間線量率は0.18 ($\mu\text{Sv/h}$)であり、本所規程による一般区域の基準(0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 以下)を満足するとともに法による規制値 ($300 \mu\text{Sv/w} = 1.78 \mu\text{Sv/h}$)を十分下回る。

なお、これらの空間線量率は、陽子線形加速器実験装置による寄与(D点において0.63 nSv/h、K点において0.96 nSv/h)を含んでいる。

6.5.2 敷地境界

敷地境界に寄与する線源としては、ダンプ、コリメータ、取り出しキッカー、リング偏向電磁石及び加速管でのビームロスがある。敷地境界線量が最も高くなる運転モードはダンピングリングモードであるので、ダンピングリングモードのビーム損失、最も近い敷地境界（図 1 A 点）までの距離500 m、年間運転時間1000 hを(18)式に代入する事により83 nSv/yが得られる。さらに、陽子線形加速器実験装置からの寄与1.1 nSv/yを足し合わせると、合計84 nSv/yとなる。これは、法による敷地境界に対する規制値（3ヶ月当たり250 μSv ）を十分下回るとともに、本所設計基準50 $\mu\text{Sv/y}$ を十分下回る。

7 誘導放射能の推定

7.1 発生装置室における空気の取り扱い

発生装置室内の空气中放射能濃度はビーム損失の状況、ビーム損失の起こった周辺の電磁石等の幾何学的配置等に大幅に依存する。

本申請に係わる発生装置では、電子の加速性能の研究を行うことを主目的としているので、加速された電子ビームは全て、直接、ビーム・ダンプまたは、ターゲットに捨てられる。ビーム・ダンプ入口から挿入されるビーム・ダクト周辺は密閉構造になるようコーキング剤を充填する。このようにビーム・ダンプ内の空気はここから容易にビーム・ダンプ外へ出ることは無い。従って、ダンプにおいて放射化した間隙の空気は完全に封じ込められており発

表 8: 発生装置室空气中に生成する放射性核種

| 核種 | 半減期 | 核反応の種類 | しきい値 (MeV) | 核種 | 半減期 | 核反応の種類 | しきい値 (MeV) |
|-----------------|--------|--|---------------|------------------|--------|---|---------------|
| ^3H | 12.2 年 | $^{14}\text{N}(\gamma, ^3\text{H})^{11}\text{C}$ | 22.7 | ^{13}N | 9.9 分 | $^{14}\text{N}(\gamma, \text{sp})^{13}\text{N}$ | 10.5 |
| | | $^{16}\text{O}(\gamma, ^3\text{H})^{13}\text{N}$ | 25.0 | ^{15}O | 123 秒 | $^{16}\text{O}(\gamma, \text{n})^{15}\text{O}$ | 15.6 |
| ^7Be | 53.6 日 | $^{14}\text{N}(\gamma, \text{sp})^7\text{Be}$ | 27.8 | ^{38}Cl | 37.2 分 | $^{40}\text{Ar}(\gamma, \text{pn})^{38}\text{Cl}$ | 20.5 |
| | | $^{16}\text{O}(\gamma, \text{sp})^7\text{Be}$ | 31.8 | ^{39}Cl | 55.5 分 | $^{40}\text{Ar}(\gamma, \text{p})^{39}\text{Cl}$ | 12.5 |
| ^{11}C | 20.3 分 | $^{14}\text{N}(\gamma, \text{sp})^{11}\text{C}$ | 22.7 | | | | |
| | | $^{16}\text{O}(\gamma, \text{sp})^{11}\text{C}$ | 25.8 | | | | |

生装置室内空気放射能濃度の増加に寄与しない。また、ターゲットも気密構造の中性子チェンバー内に設置するので、ターゲットにおいて放射化した空気も発生装置室内空気放射能濃度の増加に寄与しない。

発生装置全体はコンクリート・ブロックにより作られたシールド・ルームに設置される。シールド・ルーム作成に当っては密閉構造となるように、各ブロックの継目にコーキング剤を施す。発生装置室の空気の外部への放出は排気設備を通して行う。

運転に伴って発生装置室内の空气中に生成する放射能濃度を推定することは非常に困難であるが、ここではSwanson[9]の方法で評価する。

電子線形加速器の特徴として、高エネルギーに加速されたビームが加速管壁等で大きなビーム損失を起こすことは極めて希であるが、ここでは損失したビームがビーム・ダクトのフランジ(2 cm厚、鉄として2.2 輻射長)に照射され、発生する制動放射線が電磁石間等の空気を放射化することを考える。リニアック室内での最大ビーム損失として、L2モードでの、150 MeV、1.6 μA ビームの0.5%損失を仮定し、その内の10%の部分が室内の空気放射化に寄与すると仮定する⁷。(残り90%については局所遮蔽内でエネルギーを失うとする。)ダンピングリング室内でのビーム損失として、リングの全偏向電磁石での損失、コリメータ2および取り出しキッカー2での損失を考慮する。リニアック室の容積は1141 m^3 (高さ3.0 m、幅3.5 m、長さ108.7 m)であり、ダンピングリング室の容積は4200 m^3 (高さ3.0 m、床面積1400 m^2)である。リニアック室内およびダンピングリング室内の空気は原則的に運転時に換気をせず空調のため循環するのみである。

発生装置運転に伴って発生装置室内空气中に生成する主な核種を表8に示した。これら

⁷DRモードでは、第1加速管とコリメータの両方でビーム損失がある。しかし、DRモードでは電流が少ないため、空気放射化に寄与するビーム損失は、L2モードの0.075倍であり、DRモードでの放射化はL2モードでの放射化より少ない。

表 9: 空气中飽和放射能濃度およびその規制値

| 核種 | 飽和放射能 (Bq/m/kW) | (DAC) _a *1 (Bq/cm ³) | (DAC) _{p,a} *2 (Bq/cm ³) | 飽和放射能濃度 (Bq/cm ³) | |
|------------------|-----------------------|--|--|-------------------------------|------------------------|
| | | | | リニアック | リング |
| ³ H | 5 × 10 ⁶ | 7 × 10 ⁻¹ | 5 × 10 ⁻³ | 1.1 × 10 ⁻⁶ | 6.0 × 10 ⁻⁷ |
| ⁷ Be | 1 × 10 ⁶ | 3 × 10 ⁻¹ | 2 × 10 ⁻³ | 2.1 × 10 ⁻⁶ | 1.2 × 10 ⁻⁷ |
| ¹¹ C | 1.9 × 10 ⁴ | 1 × 10 ⁻¹ | 6 × 10 ⁻⁴ | 4.0 × 10 ⁻⁹ | 2.3 × 10 ⁻⁹ |
| ¹³ N | 5.2 × 10 ⁸ | 1 × 10 ⁻¹ | 6 × 10 ⁻⁴ | 1.1 × 10 ⁻⁴ | 6.2 × 10 ⁻⁵ |
| ¹⁵ O | 5.6 × 10 ⁷ | 1 × 10 ⁻¹ | 6 × 10 ⁻⁴ | 1.2 × 10 ⁻⁵ | 6.7 × 10 ⁻⁶ |
| ³⁸ Cl | 2.2 × 10 ⁵ | 5 × 10 ⁻¹ | 4 × 10 ⁻³ | 4.6 × 10 ⁻⁷ | 2.6 × 10 ⁻⁸ |
| ³⁹ Cl | 1.5 × 10 ⁶ | 7 × 10 ⁻¹ | 5 × 10 ⁻³ | 3.2 × 10 ⁻⁶ | 1.8 × 10 ⁻⁷ |

*1 空气中濃度限度 *2 排気中濃度限度

の核種について飽和放射能濃度を計算した。Swanson [9] によれば、電子加速器室内の空气中飽和放射能は表 9 第 2 欄に示される値である。制動放射光子が空气中を走る距離を 2 m と仮定し、ビームロスと室内体積を代入すると表 9 第 5 欄および第 6 欄に示す飽和放射能濃度が得られる。施行令に示される主な核種の空气中放射能濃度限度 (DAC)_a および排気中放射能濃度限度 (DAC)_{p,a} は表 9 の第 3、4 欄に示す通りである。飽和放射能濃度の値は排気中濃度限度に係わる法の規制値を下回っている。

一方、法よりも厳しい管理を行っている本所管理区域及び敷地境界における排気に係わる管理基準はそれぞれ (DAC)_a の 1/10 および (DAC)_{p,a} の 1/20 であり、¹³N の敷地境界値について若干上記放射能濃度は上回る。しかし、発生装置室内の空気は運転中排気せず、¹³N は運転停止後速やかに崩壊により減少するため、3 月間についての平均濃度では、本所の基準を下回る。なお、安全のため発生装置室内空気は放射線モニターによってその濃度を監視し排出する。

7.2 冷却水の取り扱い

加速管、電磁石等は純水冷却水によって冷却しながら運転されている。加速されたビームが直接冷却水配管系を照射することはないが、加速電子の一部がスリットあるいは加速管壁等にあたり、これによって発生する制動放射線による冷却水の放射化が考えられる。さらに放射化された冷却水配管表面から放射性核種の溶出による冷却水の汚染も考慮しなければならない。

発生する制動放射線と水を構成する酸素原子核との反応で生成する核種の中で放射線管理

表 10: 冷却水中に生成する主な放射性核種

| 核種 | 半減期 | 核反応 | しきいエネルギー (MeV) | A_s^{*1} (Ci/kW) |
|-----------------|--------|--|-------------------|-----------------------|
| ^3H | 12.2 y | $^{16}\text{O}(\gamma, ^3\text{H})^{13}\text{N}$ | 25.02 | 0.2 |
| ^7Be | 53.6 d | $^{16}\text{O}(\gamma, 5n4p)^7\text{Be}$ | 31.86 | 0.04 |
| ^{11}C | 20.3 m | $^{16}\text{O}(\gamma, 3n2p)^{11}\text{C}$ | 25.88 | 0.4 |
| ^{13}N | 9.96 m | $^{16}\text{O}(\gamma, p2n)^{13}\text{N}$ | 28.89 | 0.1 |
| ^{15}O | 123 s | $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$ | 15.67 | 9 |

*1 飽和値。 $E_0 \geq 50$ MeV の加速電子の全エネルギーが水の中で失われた場合。

の対象となる主なものを表 10 に示した。表中の A_s (飽和放射能) は Swanson による計算結果 [9] で、50 MeV 以上の加速電子に対し、その電子のエネルギーの全てが水の中で失われた場合の生成量に相当する。例えば、本加速器の場合ビーム損失 (0.5%) の全てが水の中でエネルギーを失うとし、リニアック冷却水量 (3 m³) 中に生成する放射能濃度 (飽和時) は最も生成量の大きい¹⁵O について

$$0.15 \text{ GeV} \times 1.6 \mu\text{A} \times 0.005 \times 0.1 \times 9 \text{ Ci/kW} \times 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq/Ci} \times 0.5\% \\ \times \frac{1}{3 \times 10^6 \text{ cm}^3} = 108 \text{ Bq/cm}^3$$

程度と見積ることが出来る。リニアックでの主なビーム損失 (第1加速管、ダンプ1) およびリングでの主なビーム損失 (リング偏向電磁石、ダンプ3) による冷却水中放射能濃度を排水中濃度限度 ((DAC)_{p,w}) とともに表 11 に示す。リングの冷却水は 4 m³ である。本所における放射性排水に係わる管理基準は告示別表に示される値の 1/20 で、最も厳しい¹³N について、その値は $2.5 \times 10^{-5} \text{ Bq/cm}^3$ である。表 11 に示すように¹¹C (半減期: 20 分)、¹³N (半減期: 10 分) および¹⁵O (半減期: 2 分) の飽和放射能濃度は、本所の基準を超える。しかしいずれも短半減期であることから、運転停止とともに急速にその放射能レベルが減少する。それぞれの核種の濃度が本所の基準を下回るのに要する時間を表 11 の必要減衰時間として示す。約 2.5 時間の冷却時間により、その放射能レベルは本所管理基準を下回るとともに法による規制値を十分下回る。なお、¹⁵O、¹³N 等の短半減期核種について施行令では (DAC)_{p,w} の値が示されていないが、實際上これら短半減期核種の経口摂取による一般公衆の内部被曝線量は無視しうるものと考えられる。

一方、放射化された冷却水配管材等から溶出する放射線管理上問題となる主要な核種は⁶⁴Cu (半減期: 12.8 時間)、⁵⁶Ni (6.4 日)、⁵⁸Co (71 日)、⁵⁷Co (270 日)、⁵⁴Mn (291 日)、⁵²Mn (5.7 日)、⁵¹Cr (27.8 日)、⁴⁶Sc (85 日) 等である。水中に溶出するこれらの濃度は

表 11: 冷却水中放射能濃度およびその規制値

| 核種 | (DAC) _{p-w} ^{*1} (Bq/cm ³) | 飽和放射能濃度 (B)(Bq/cm ³) | | | | 必要減衰 時間 ^{*2} |
|-----------------|---|----------------------------------|------|----------|------|--------------------------|
| | | 第1加速管 | ダンプ1 | リング偏向電磁石 | ダンプ3 | |
| ³ H | 60 | 2.4 | 100 | 0.5 | 50 | — |
| ⁷ Be | 30 | 0.48 | 20 | 0.1 | 10 | — |
| ¹¹ C | 300 | 4.8 | 200 | 1 | 100 | 52.8分 |
| ¹³ N | (5×10 ⁻⁴) | 1.2 | 50 | 0.25 | 25 | 144分 |
| ¹⁵ O | (5×10 ⁻⁴) | 110 | 4500 | 23 | 2300 | 39分 |

*1 排水中濃度限度 *2 半減期・ $\frac{1}{\log 2} \cdot \log\left(\frac{20B}{(DAC)_{p-w}}\right)$

極微量である。⁷Beを含めこれらの核種は冷却水配管系の中に設置されるイオン交換樹脂塔(陽、陰イオン交換樹脂混合型カラム)によって効率良く吸着捕集される。

管理区域内で万一冷却水が漏洩したとしても、その水は管理区域内に設置されている桝に一旦集められ、さらにステンレス製の貯留槽に移送される。貯留槽の水を排水する場合は排水モニターによってその放射能濃度が本所排水管理基準値以下であることを確認の上放流する。

放射線安全管理上問題となる核種は³Hである。³Hについてその飽和時の濃度は表 10 から 100 Bq/cm³ であり、この値は排水に係わる規制値(60 Bq/cm³)を上回っている。このため、貯留槽に集めた排水中の³H濃度を液体シンチレーションカウンター等によって監視し、そのレベルが上記排水管理基準を下回っていることを確認し放流する。放射能レベルが上記の値を超える場合はRI処理施設に運搬し、処理をおこない、その濃度が本所排水基準以下であることを確認した上で放流する。また、ダンプ2はビーム損失が大きいので、図 17 に示すような2重ループ構造とする。

8 発生装置に係わる安全対策

8.1 ビーム・インターロック装置

本発生装置の運転に係わる放射線業務従事者の放射線安全を確保するため、以下に述べるビーム・インターロック・システムを本発生装置に組み込む。図 18~22 に変更前のインターロックを示す。変更後のインターロックを図 23~26 に示す。運転に関連する信号が全て正常出力となってはじめてビームが加速可能となる。変更の前後において非常停止スイッチ、退避確認スイッチ、遮蔽扉、非常扉の設置場所および数量は変わらない。本変更で

は変更前のDR室とBT室をまとめてダンピングリング室とする。同時に変更前のDR室とBT室境界の扉付きフェンス（2箇所）を廃止する。また、リニアックモード中にDR室に入室している作業者の被曝防止の目的で設置されたロスモニタは、リニアックモード中もDR室入室を禁止する事で不要となったので廃止する。

1. 非常停止スイッチ

発生装置室内および運転制御室内には、非常の場合に加速器の運転を停止する非常停止スイッチを設置する（図 5 非常停止スイッチ 1~18 参照）

2. ドア扉スイッチ

発生装置室内の入出扉には、リミットスイッチを取付け、すべての扉のうち1箇所でも開放されている時は、運転不可とする。なお扉はいかなるときも内側からは開けることが可能な構造となっている。リニアック室とダンピングリング室の境界に設置する気密ドアは、安全のため常時閉とし、一定時間開状態が保持された場合には、大音量の警告音を発するようにする。

3. 退避確認スイッチ

発生装置室内には、リニアック室またはダンピングリング室を最後に退出する者に、当該室が無人であることを確認させる目的で、退避確認スイッチを設置する（図 5 参照）。これは運転可能条件の1つとしてインターロック・システムに接続する。運転に関連する区域の退避確認スイッチがすべて投入されないと運転はできない。また関連する区域の扉がいったん開放されると、退避確認スイッチは自動的に非投入状態となる。

4. リニアック室パーソナルキー

リニアック室の出入口にリニアック室用のパーソナルキー・ボックスを設置し、リニアック室に入室の際には各人がリニアック室用のパーソナルキーを携帯する。

リニアック室のパーソナルキーがすべてリニアック室用パーソナルキー・ボックスのキー受けに戻っていることを、全モードの運転可能条件の1つとしてインターロック・システムに組み込む。

5. ダンピングリング室パーソナルキー

ダンピングリング室の出入口にダンピングリング室用のパーソナルキー・ボックスを設置し（図 5 参照）、ダンピングリング室に入室の際には各人がダンピングリング室パーソナルキーを携帯する。

ダンピングリング室パーソナルキーがすべてダンピングリング室パーソナルキー・ボックスのキー受けに戻っていることを、全モードの運転可能条件の1つとしてインターロック・システムに組み込む。

6. ストッパー

ダンピングリングには入室の際の安全を確実に確保するためにビームストッパーを一箇所設ける。リングの運転ではビームの入射と取り出しを25Hzで繰り返しているので、リニアックが停止し、ビームの供給が無くなれば、ビームはリング内に存在しない。従って、定常状態でのビーム強度でストッパーに照射する事はない。ダンピングリングモードでストッパーがビームラインに挿入されているときは、運転不可とする。

7. 最大出力

最大ビーム出力は、表 2 および 3 に示すように運転モードによって異なり、リニアックでは最大 $2.464 \text{ GeV}\cdot\mu\text{A}$ でありリングでは最大 $107.8 \text{ GeV}\cdot\text{mA}$ である。加速電流が各モードに対応した最大電流値を超えないよう、図 25 に示すロジックをインターロックに組み込む。図 23 に示すモード選択に連動して、図 25 中のモード別の最大電流値が自動的に選択される。電流の制限は1時間を単位として行うので、図 25 に示す制限も1時間の積算電流に対して行う。積算電流が、モード別最大積算電流を超えた場合には、本加速器は自動的に停止し、正時まで運転不可能になる。DRモード以外で、リニアックの加速エネルギーが 1.54 GeV を超える場合には、電流を表 2 に示す最大電流の1/2以下に制限する。DRモードでは、常に 1.54 GeV 以下で運転する。従って、表 2 および 3 に示す最大出力を超える出力で本発生装置を運転する事はない。また、最大加速電荷の制限と放射線モニタによるインターロックで2重の監視を行っているので、安全が損なわれる事はない。

8. 放射線モニター

放射線管理区域の境界(図 3)に設置する。放射線モニターの1時間の積算線量が本所の基準 ($0.2 \mu\text{Sv}$) を越えた場合には、自動的に運転停止となり、次の正時までにはリセット不可である。なお、陽子線形加速器実験装置に最も近いモニターの信号は、同装置のインターロックにも組み込む。

8.2 その他の安全に係わる装置

1. 電話

発生装置室内と運転制御室の連絡のために、各々に電話を設置する。

2. 非常口

通常の出入口（「リニアック室」、「ダンピングリング室」に各1箇所）の他に非常口（「リニアック室」に2箇所、「ダンピングリング室」に2箇所）を設置してある。すべての扉は、いかなるときも内側からは開けることが可能な構造となっている。

3. テレビカメラ

発生装置室内の状況が、運転制御室から常に監視できるよう、発生装置室内にテレビカメラを設置してある。

4. 放送設備

発生装置室内には、「運転準備完了」を知らせるための放送設備を設ける。万一、発生装置室内に取り残された人間が居て、この放送を聞いた場合には非常停止ボタンを押して、運転準備を止める事になる。

5. 管理区域内放射線モニター

放射線管理区域内に2台程度の移動式モニタを設置し、本所の一般管理区域レベル（ $20 \mu\text{Sv/h}$ ）を超えた場合に警報音を発する様にし、安全の確保を図る。

8.3 発生装置室への入出管理

リニアック室、ダンピングリング室の出入口には、それぞれパーソナルキー・ボックスが設置してあり、発生装置室内に入室するときは、各人がパーソナルキー・ボックスよりキーを抜いて携帯する。このパーソナルキー・ボックスでIDカードを照合するので、これを利用して、入出管理を行う。発生装置発生装置室内からの退室に際しては、身体または持ち出し物品について放射能汚染のないことを確認する。

8.4 運転の手順と運転状況の表示

3.6節で述べたように、リニアックの使用には6通りの方法、リングの使用には2通りの方法がある。これらすべての運転モードで発生装置室全域（リニアック室およびダンピングリング室）は立入禁止とする。以下、本発生装置を運転準備完了状態にする手順を述べる。リニアック室およびダンピングリング室の運転準備が完了して始めて、本発生装置はすべてのモードで運転準備完了となる。

8.4.1 リニアック室の運転準備

リニアック室を運転待機の状態にするには、運転者はまず巡視によって「リニアック室」が無人であることを確認する。具体的な手順としては、運転者はリニアック室の出入口か

ら入室し、ダンピングリング室との境の気密扉および2箇所非常口扉(E1、E2)の施錠を確認する。次に、リニアック室の巡視を行い、リニアック室の無人を確認し、退避確認ボタン(3箇所)を押す。巡視終了後、運転者はリニアック室の出入口を閉鎖し、リニアック室のキーボックスにパーソナルキーがすべて返却されていることを確認し、キーボックスの主キーを抜く。この操作により「リニアック室」出入口の電動遮蔽扉は、外側からは開けることができなくなる。

このリニアック室用主キーを用いて運転制御室の放射線安全監視装置のリニアック室用キースイッチをONにして始めて、リニアック室は運転準備完了となる。運転準備が完了するとリニアック室出入口の「発生装置運転表示回転灯」が点灯し、さらにリニアック室内にはブザー音によってその旨を知らせる。ビーム加速開始スイッチ投入時にも、同様のブザー音によってその旨を知らせる。

8.4.2 ダンピングリング室の運転準備

運転者は、ダンピングリング室の出入口から入室し、2箇所非常口扉(E3、E4)が施錠されていることを確認する。次にダンピングリング室の巡視を行い、無人であることを確認し、退避確認ボタン(6箇所)を押す。また、巡視終了後、運転者はダンピングリング室の出入口を閉鎖し、ダンピングリング室用キーボックスにすべてのパーソナルキーが戻っていることを確認し、キーボックスの主キーを抜く。この操作により、ダンピングリング室出入口の電動遮蔽扉は外側からは開けることができなくなる。

このダンピングリング室用主キーを用いて運転制御室の放射線安全監視装置のダンピングリング室用キースイッチをONにして始めて、ダンピングリング室は運転準備完了となる。運転準備が完了するとダンピングリング室出入口の「発生装置運転表示回転灯」が点灯し、さらにダンピングリング室内にはブザー音によってその旨を知らせる。ビーム加速開始スイッチ投入時にも、同様のブザー音によってその旨を知らせる。

リニアック室およびダンピングリング室の運転準備が完了して始めて、本発生装置はすべてのモードで運転準備完了となる。

8.4.3 運転状況の表示等

加速器運転中は、リニアック室出入口、ダンピングリング室出入口に取付けた「運転表示」に「加速器運転中」の表示を出す。また、「発生装置運転表示回転灯」を点灯する。(「運転表示」と「発生装置運転表示回転灯」の設置箇所は、図5参照。)運転中に立入禁止区域が無人であることの確認は、発生装置室内に設置されたテレビカメラにより運転制御室から目視によって行う。

9 管理区域の設定と入出管理

放射線管理区域は図 3 のように設定する。管理区域の新たに拡張する部分は、アッセンブリーホール北東部角付近のフェンスで囲まれた部分である。また管理区域を縮小する部分はアッセンブリーホール南東部角付近のフェンスで囲まれた部分である。これらの変更は、アッセンブリーホールに隣接した場所にニュートリノ振動実験用ビームラインを新設する工事を開始することに伴うものである。

管理区域への出入は西側出入口、南側出入口および北側出入口の入室管理システムにて管理する。入域が許可されている者は、ID カードを使って入室管理システムを通り入域する。管理区域への立ち入り者の出入り記録及び後述の汚染検査記録は、放射線管理室において保管する。

10 標識等を付ける箇所（変更なし）

図 3 に「管理区域（使用施設）」の標識を付す箇所を、図 5 に「放射線発生装置使用室」の標識（6箇所）、「発生装置運転表示回転灯」（4箇所）、「運転表示」（4箇所）を付する箇所を示す。

11 工事期間等

最大出力インターロック回路の変更は、ビームを使用していない時に行う。完了後、主任者立会いの検査を実施し、許可を得てから使用を開始する。更に、初期使用時には、放射線サーベイを実施して安全確認を行う。なお管理区域変更の工事は加速器停止期間中に行う。工事は、8月下旬～12月中旬を予定している。

参考文献

- [1] J. Urakawa, K. Takata and H. Hayano et al, "Proceedings of LC'95 international workshop", KEK Proceedings (KEK,Japan)(Sep. 1995).
- [2] (財) 高エネルギー加速器科学奨励会主催、「高エネルギー加速器セミナー(OHO'91) 低エミッタンスリング」テキストの中村典雄「ビーム寿命」の章、高エネルギー物理学研究所 (1991).
- [3] T. M. Jenkins, "Neutron and photon measurements through concrete from a 15 GeV electron beam on a target—Comparison with models and calculations", Nucl. Instr. Methods **159**, 265 (1979).
- [4] R. G. Alsmiller, Jr. and J. Barish, "Shielding against the neutrons produced when 400-MeV electrons are incident on a thick copper target", Particle Accelerator **5**, 155 (1973).
- [5] M. Sakano, H. Hirayama and S. Ban, "Calculations of dose equivalents due to stray radiation from a high energy electron beam in a forward direction", Radiat. Prot. Dosim. **37**, 165 (1991).
- [6] K. Tesch, "The Attenuation on the neutron dose equivalent in a labyrinth at an accelerator shield", Particle Accelerator **12**, 169 (1982).
- [7] K. Tesch, "Attenuation of the photons dose in labyrinths and ducts at accelerators", Radiat. Prot. Dosim. **20**, 169 (1987).
- [8] R. H. Thomas, "Studies on current problems of radiation shielding in KEK", KEK 78-7 (1978).
- [9] W. P. Swanson, "Radiological safety aspects of the operation electron linear accelerator", IAEA Technical Report No.188 (1977).

(執筆: 波戸 芳仁、平山 英夫、照沼 信浩、浦川 順治 File: atf96.tex)

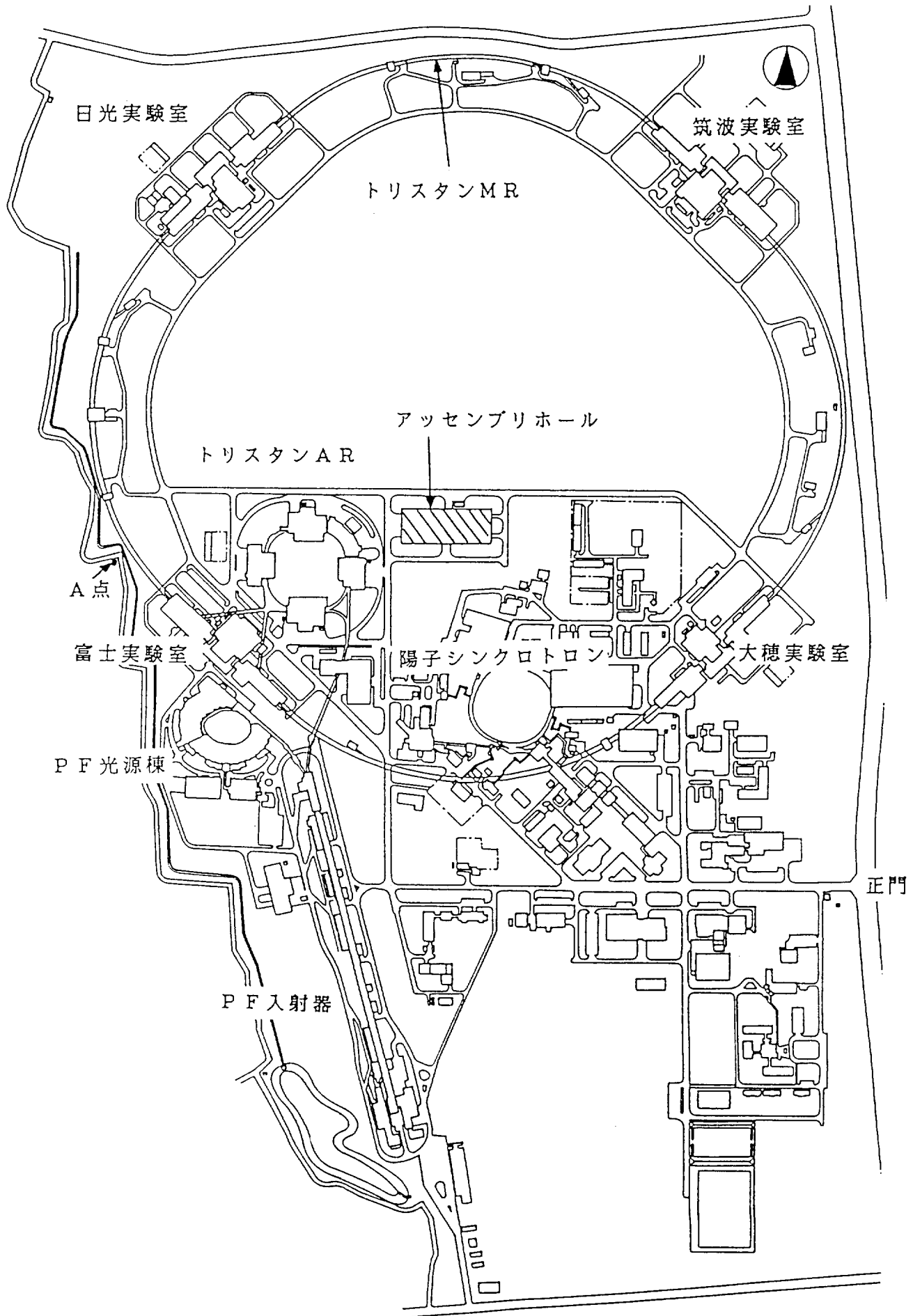
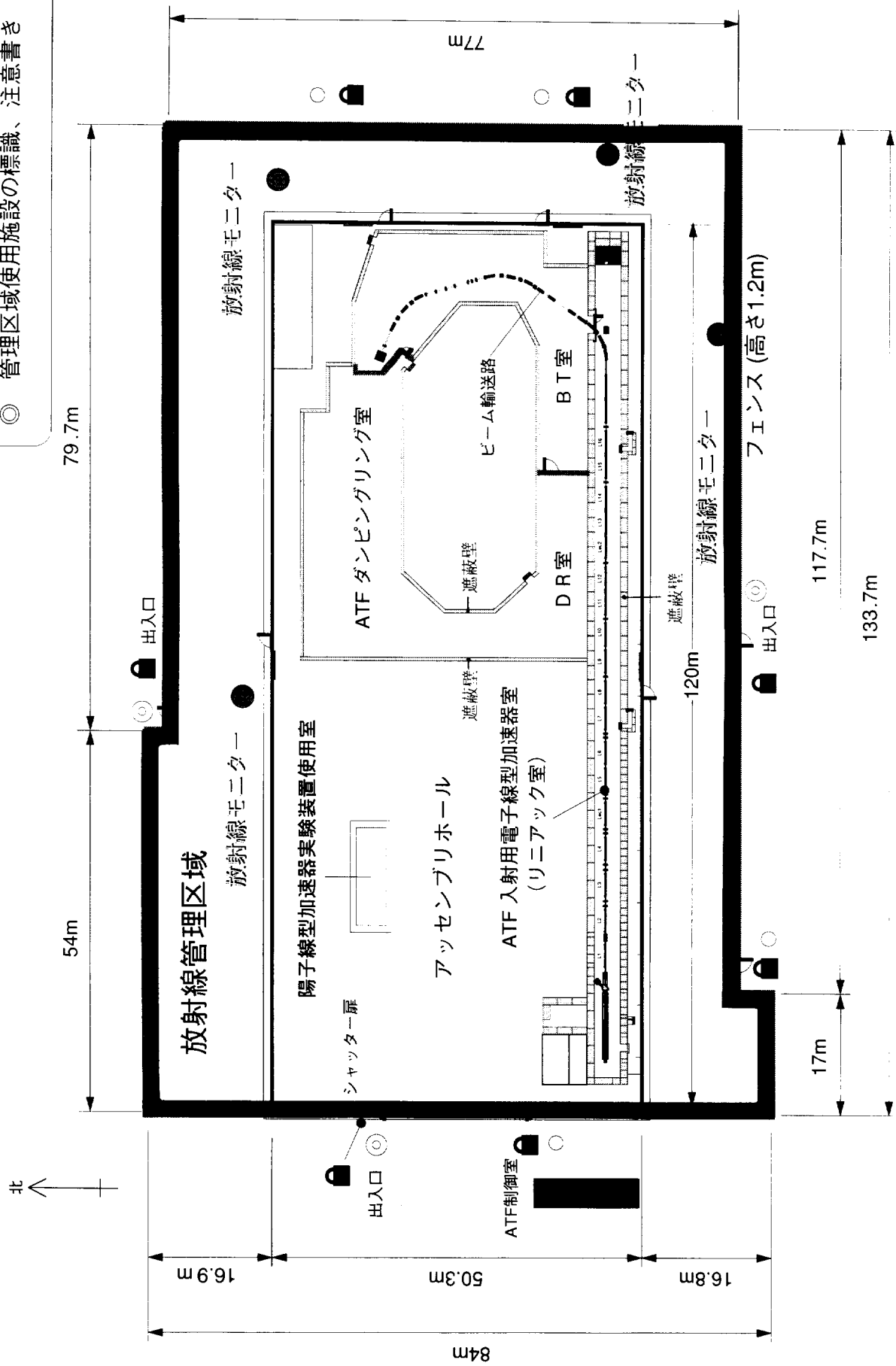


図 1: 本所全体図

- 管理区域使用施設の標識
- ◎ 管理区域使用施設の標識、注意書き

図 2: 放射線管理区域図 (変更前)



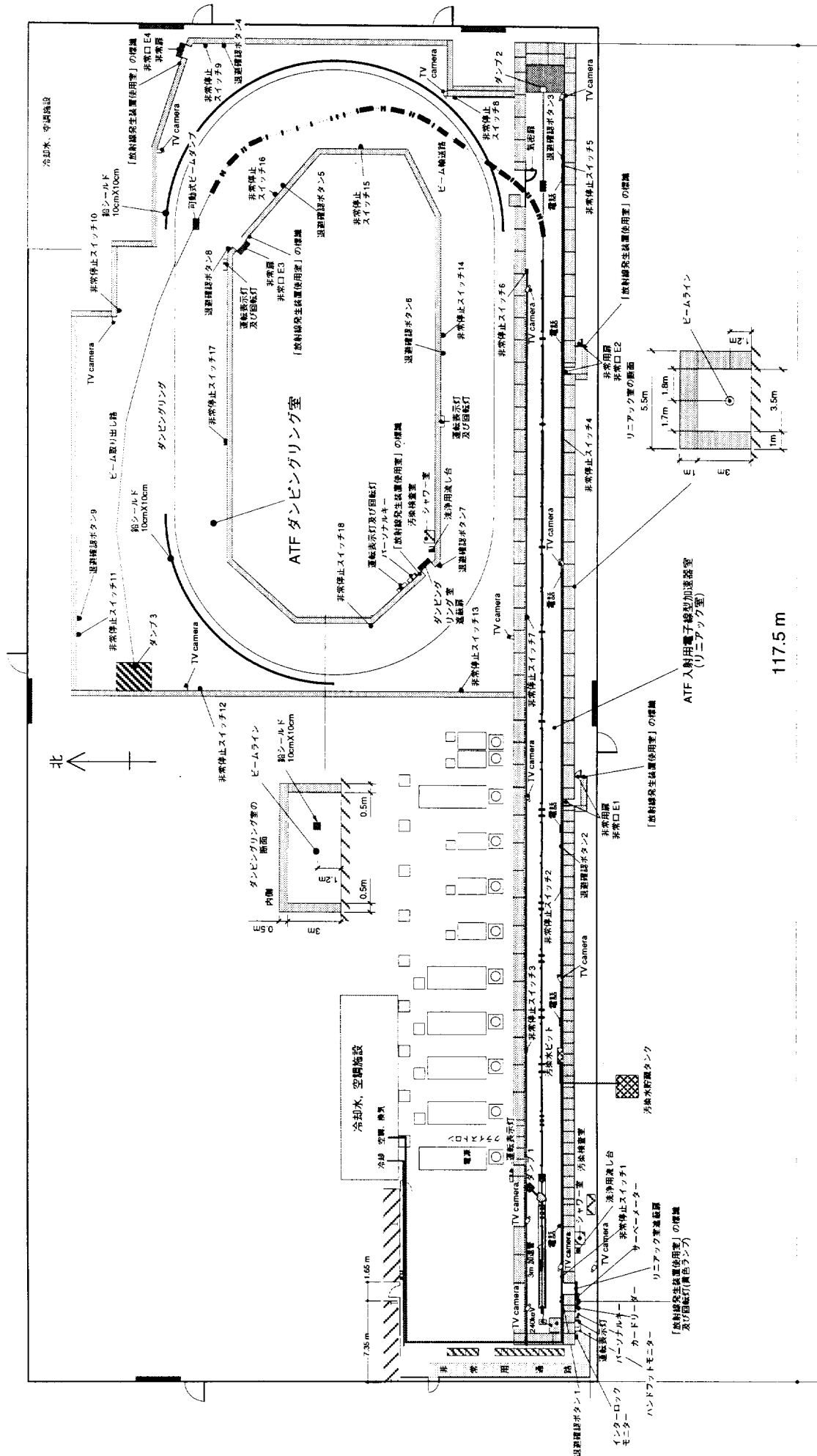


図 5: 放射線安全装置の配置図 (変更後)

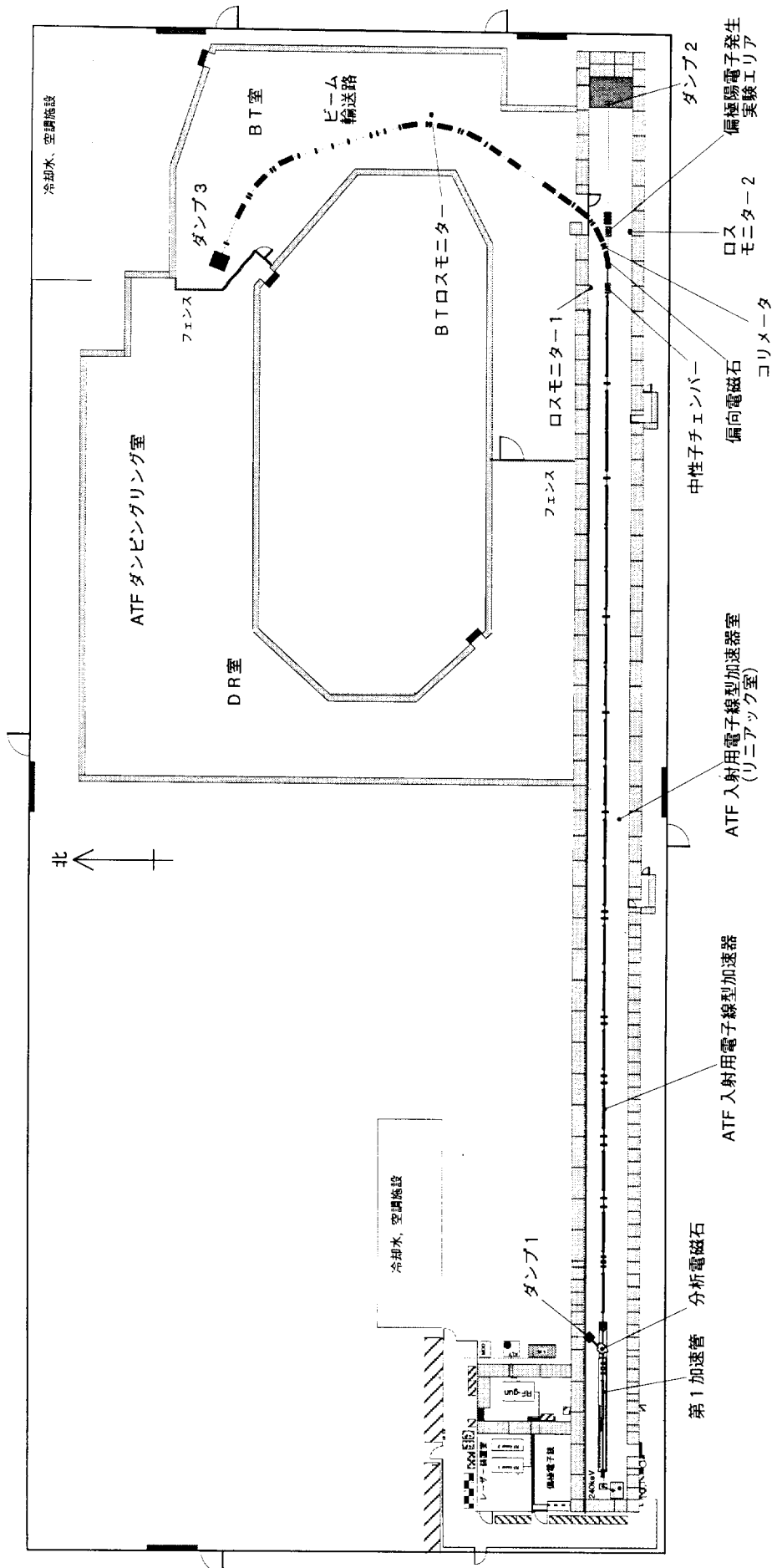


図 6: 発生装置の機器構成図 (変更前)

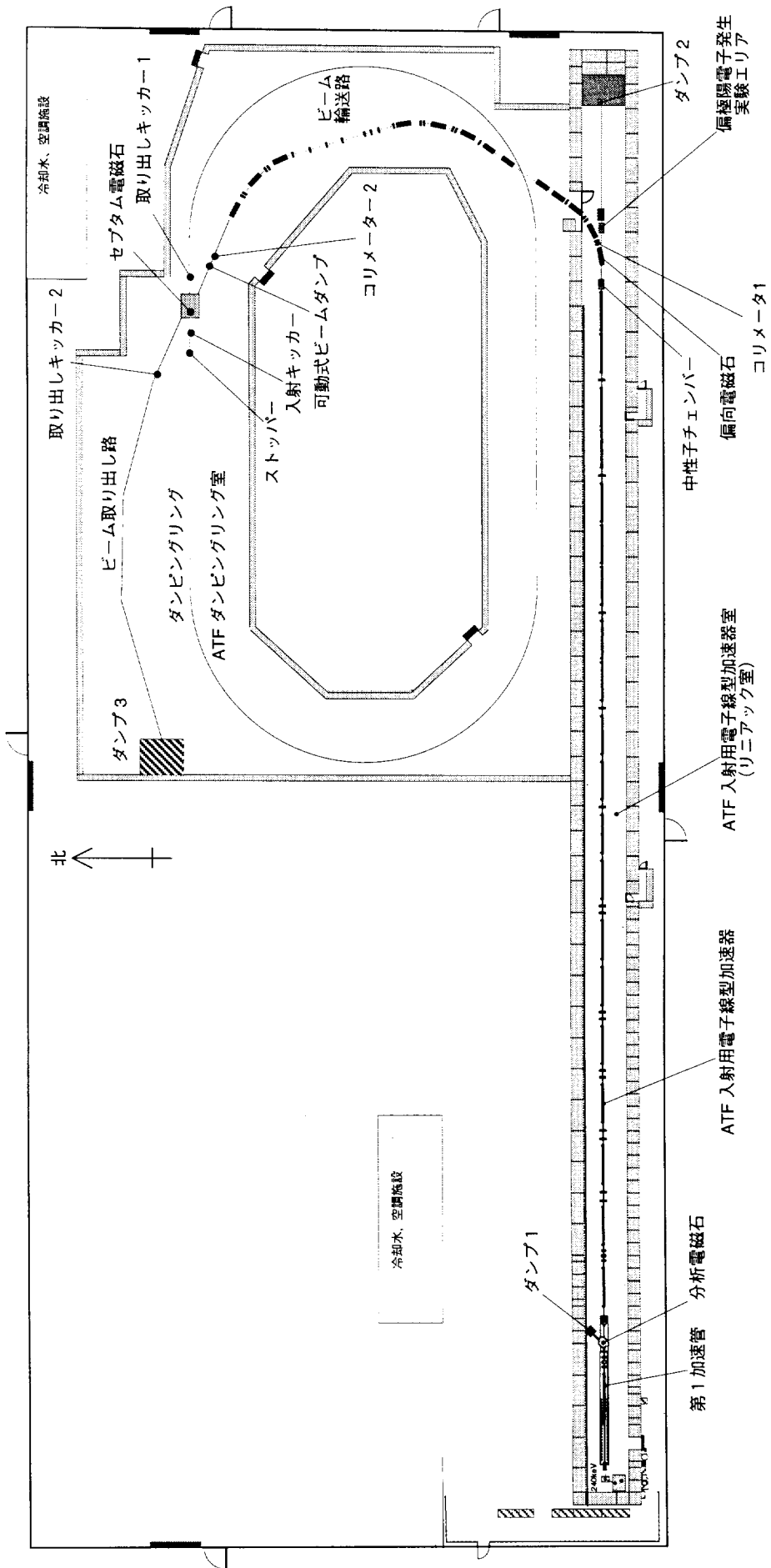


図 7: 発生装置の機器構成図 (変更後)

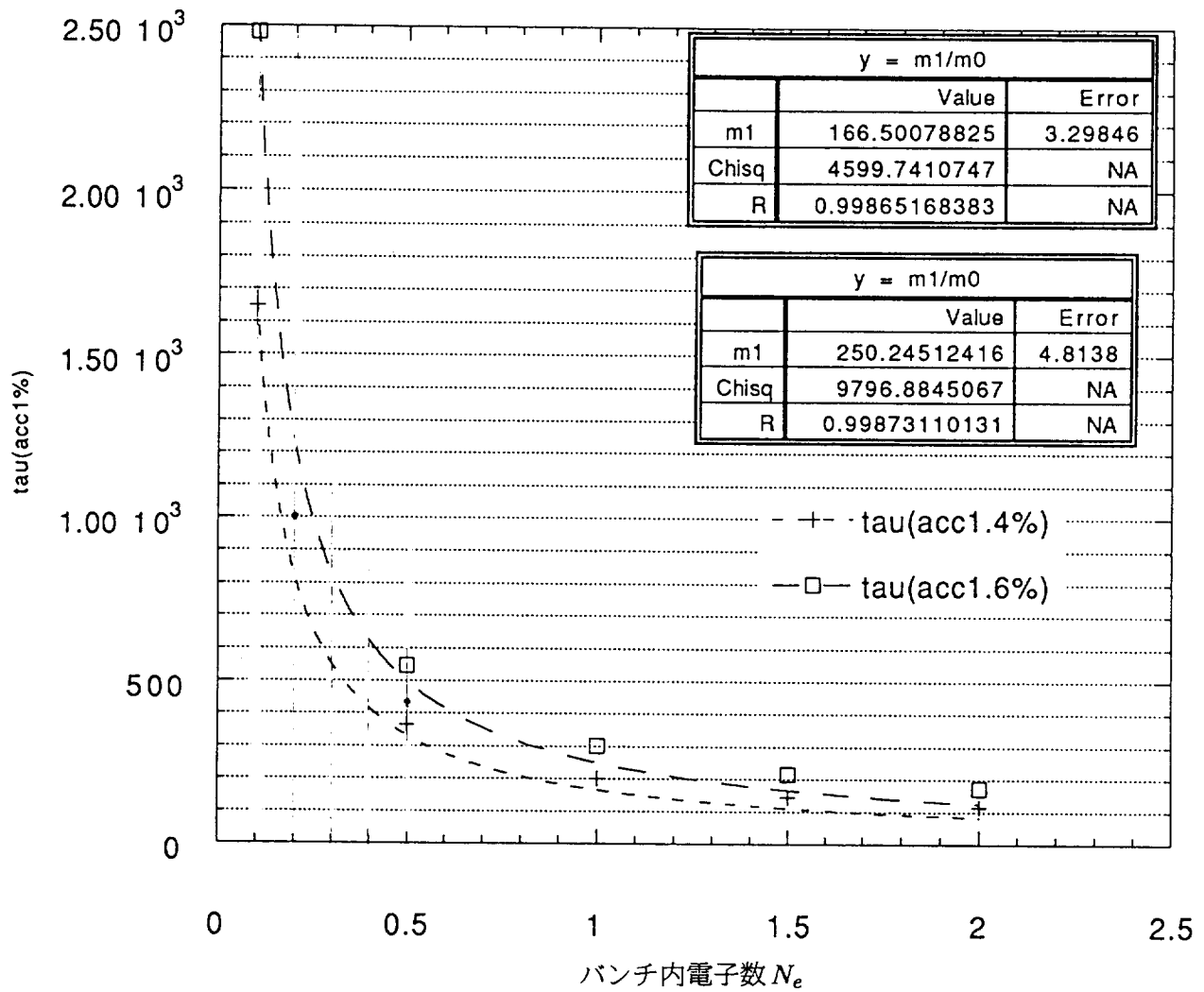


図 8: Touscheck 寿命 τ (sec) のバンチ内電子数 N_e 依存

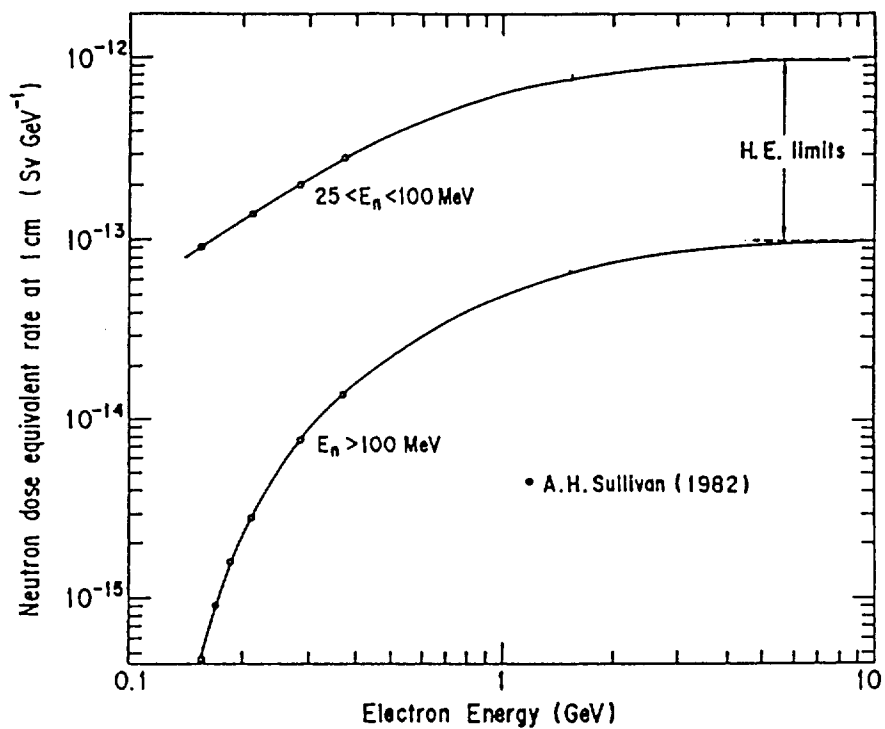


図 9: 電子ビームによる中性子発生量

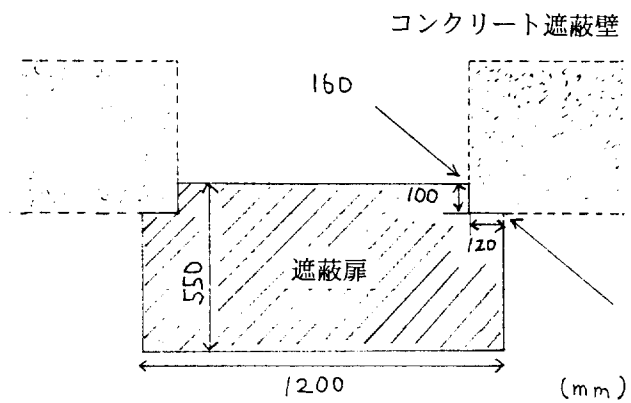


図 10: DR室の遮蔽扉（出入口およびE4）。扉とコンクリート壁の接合部の厚さは 16 cm である。

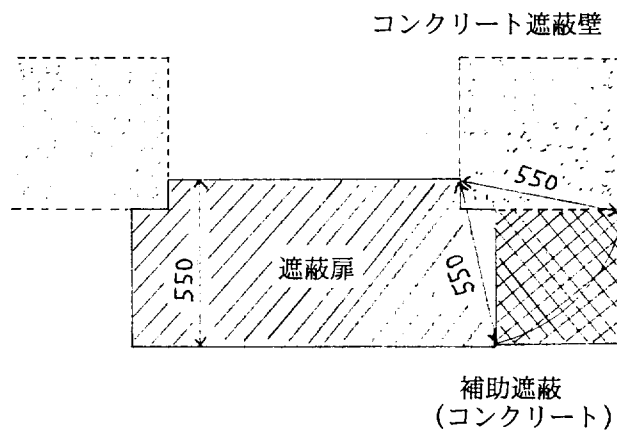
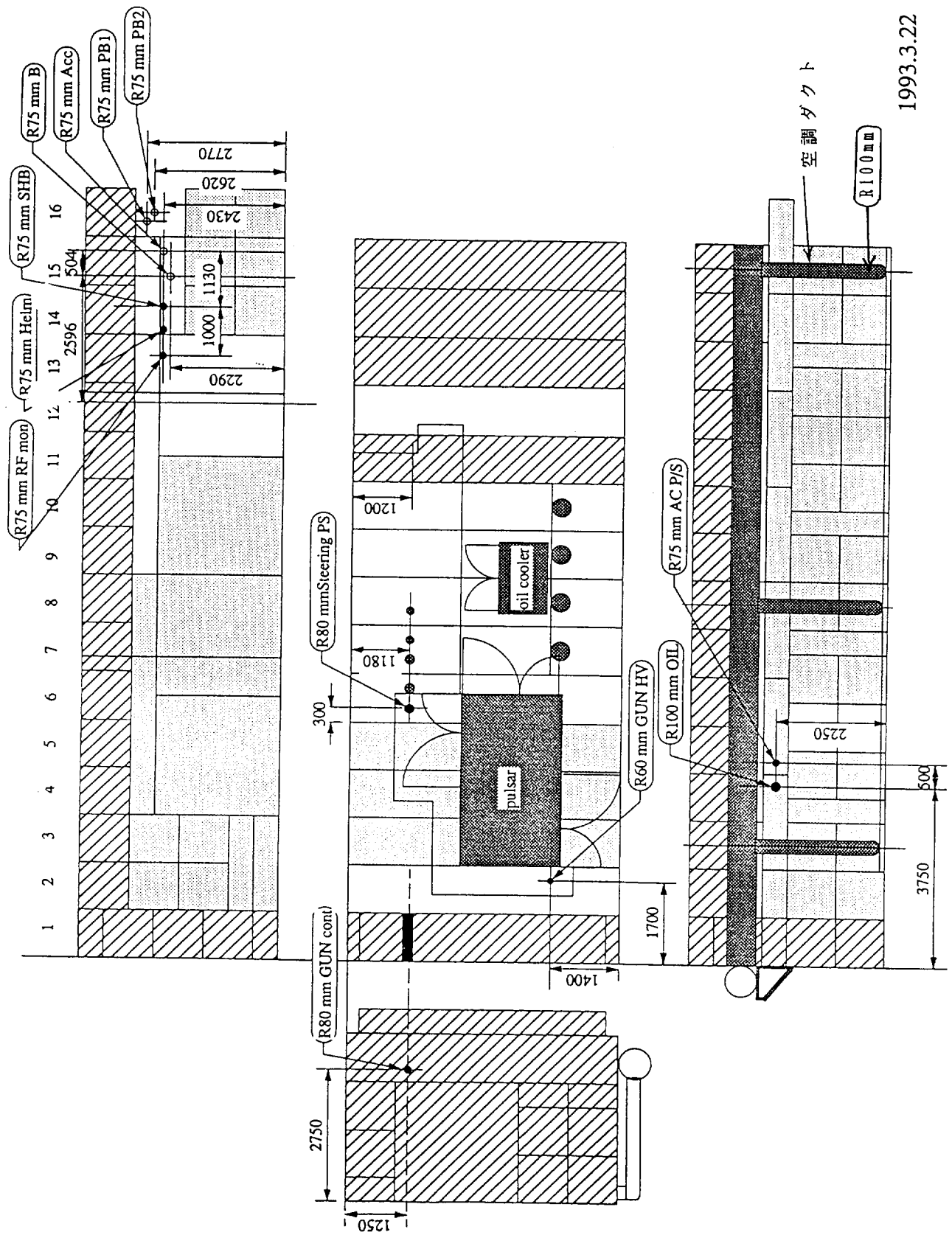


図 11: DR室遮蔽扉（E3）。接合部の厚さは 55 cm および 16 cm である。



1993.3.22

図 12: ダクト配置図

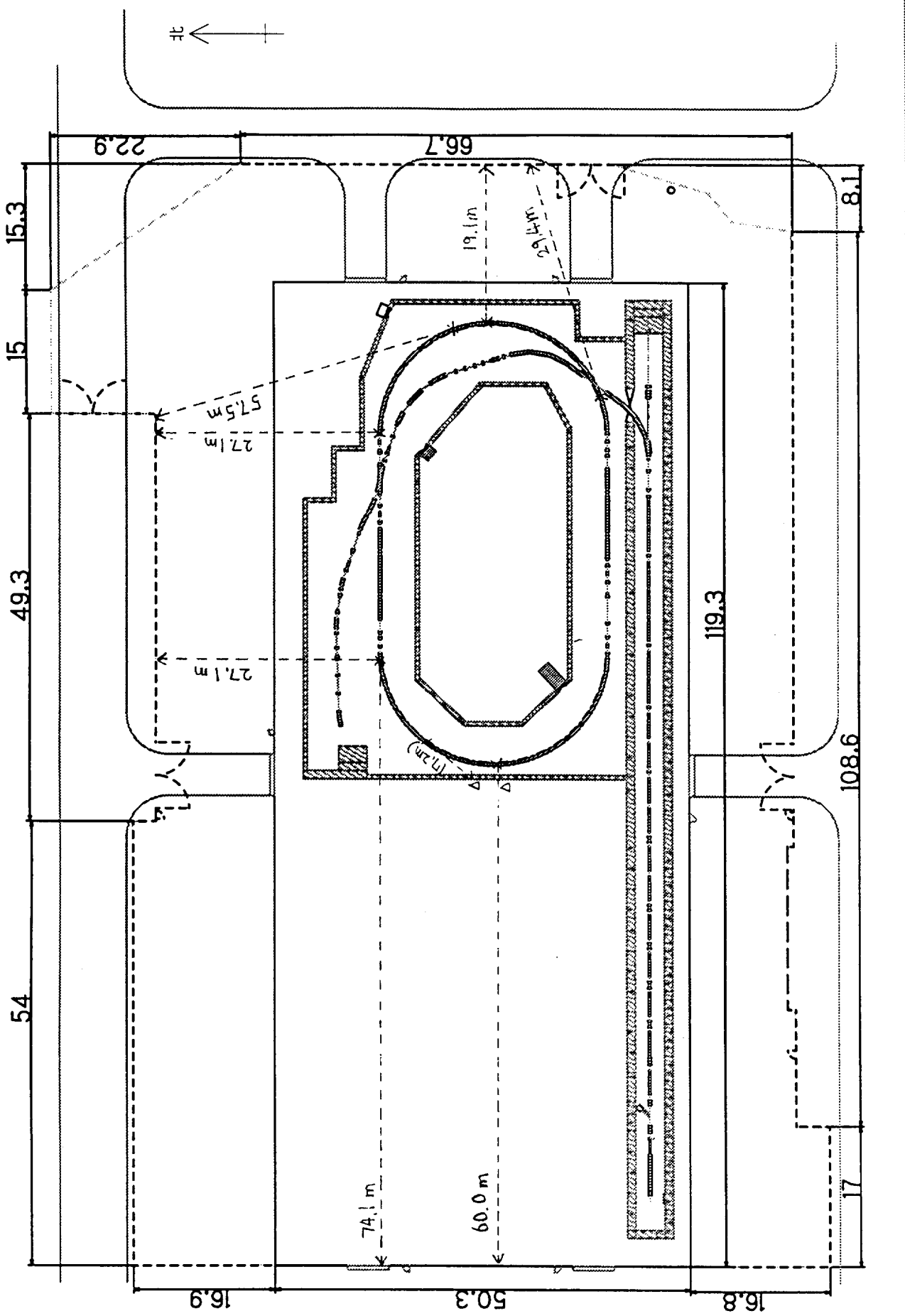


図 14: リング偏向電磁石から管理区域境界までの距離。管理区域境界を黄色線で示す。

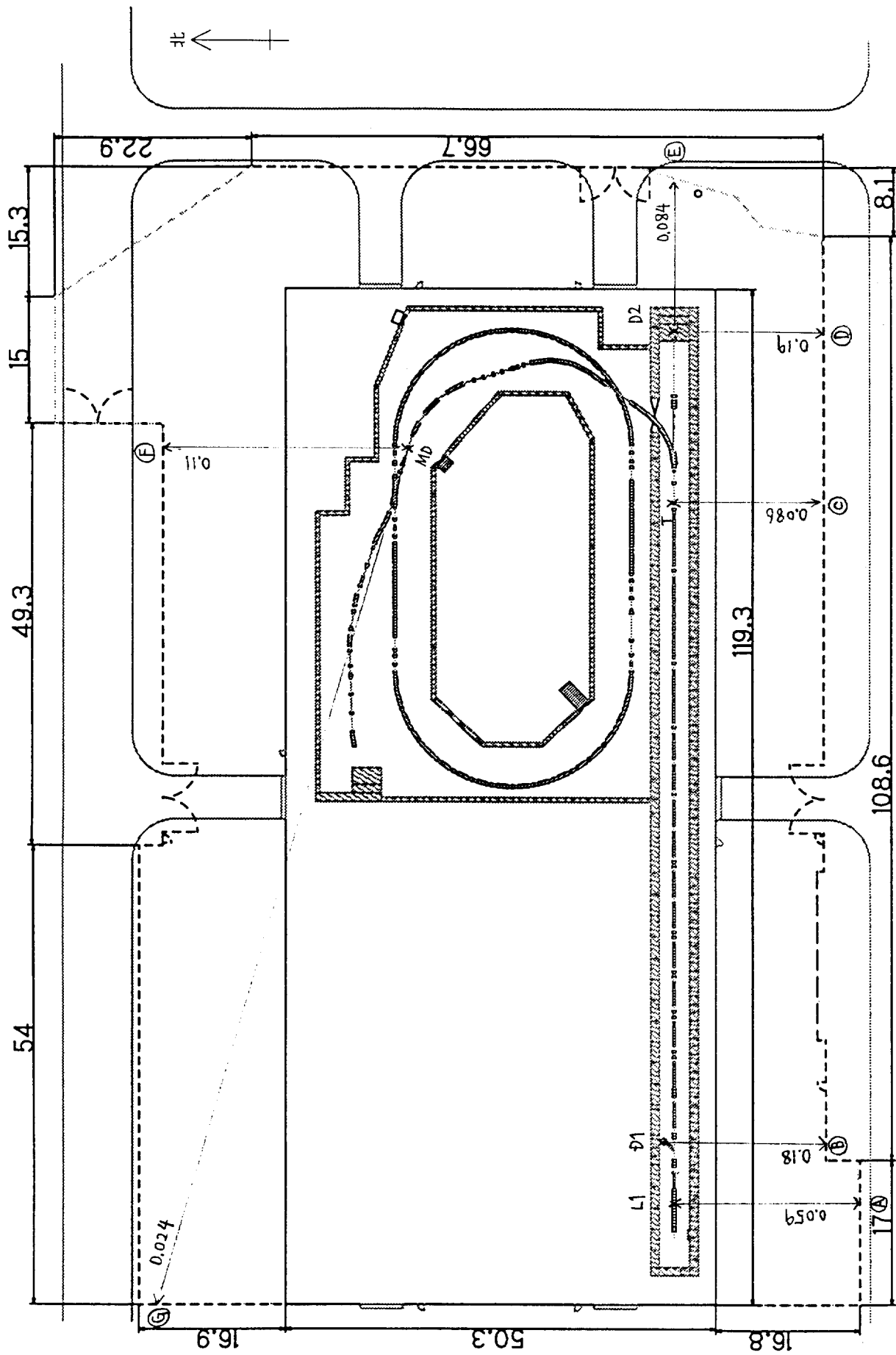


図 15: リニアックおよびBTモードでの管理区域境界空間線量率。管理区域境界を黄色線で示す。

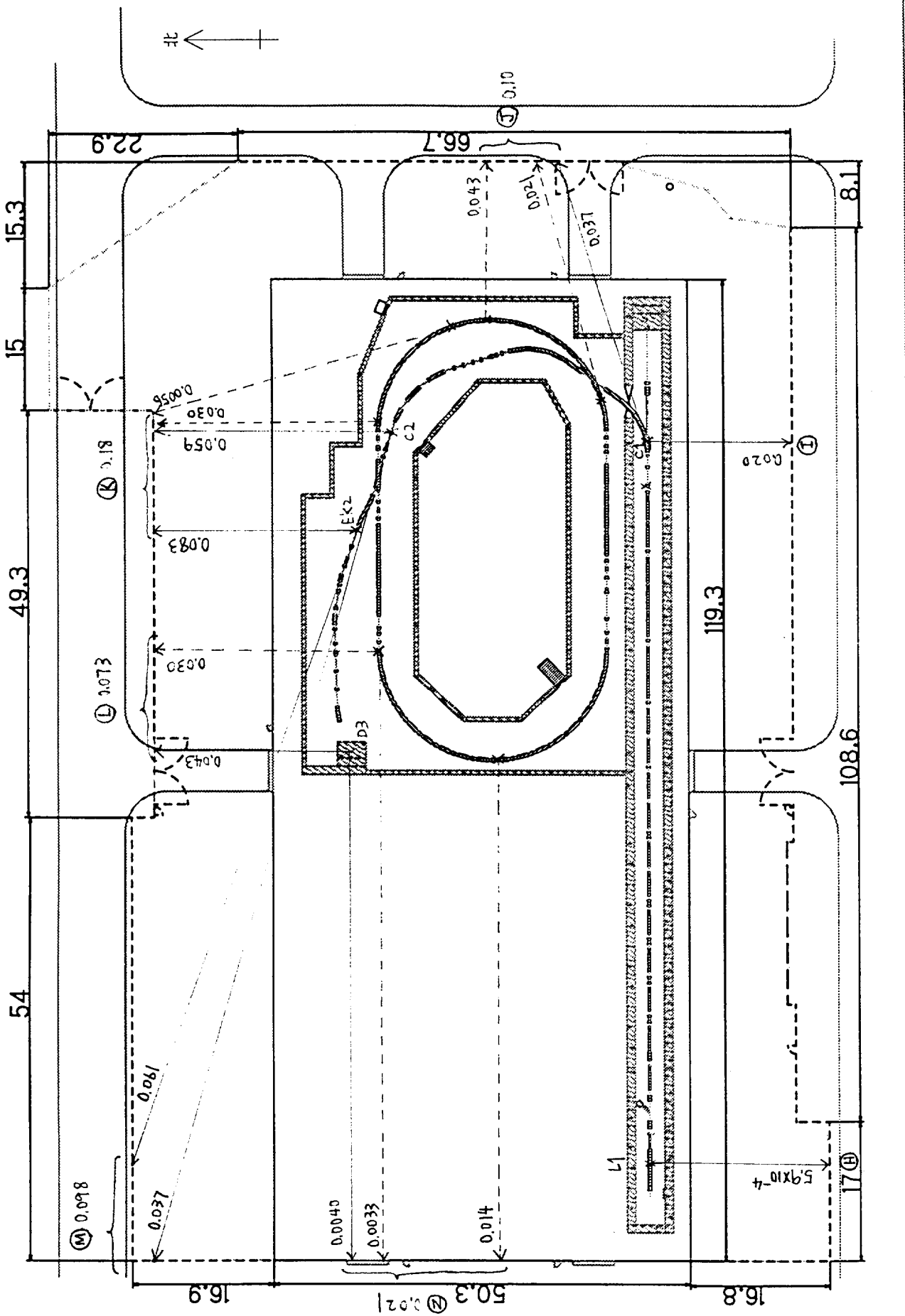


図 16: リング運転時の管理区域境界空間線量率。管理区域境界を黄色線で示す。

コンクリートシールド

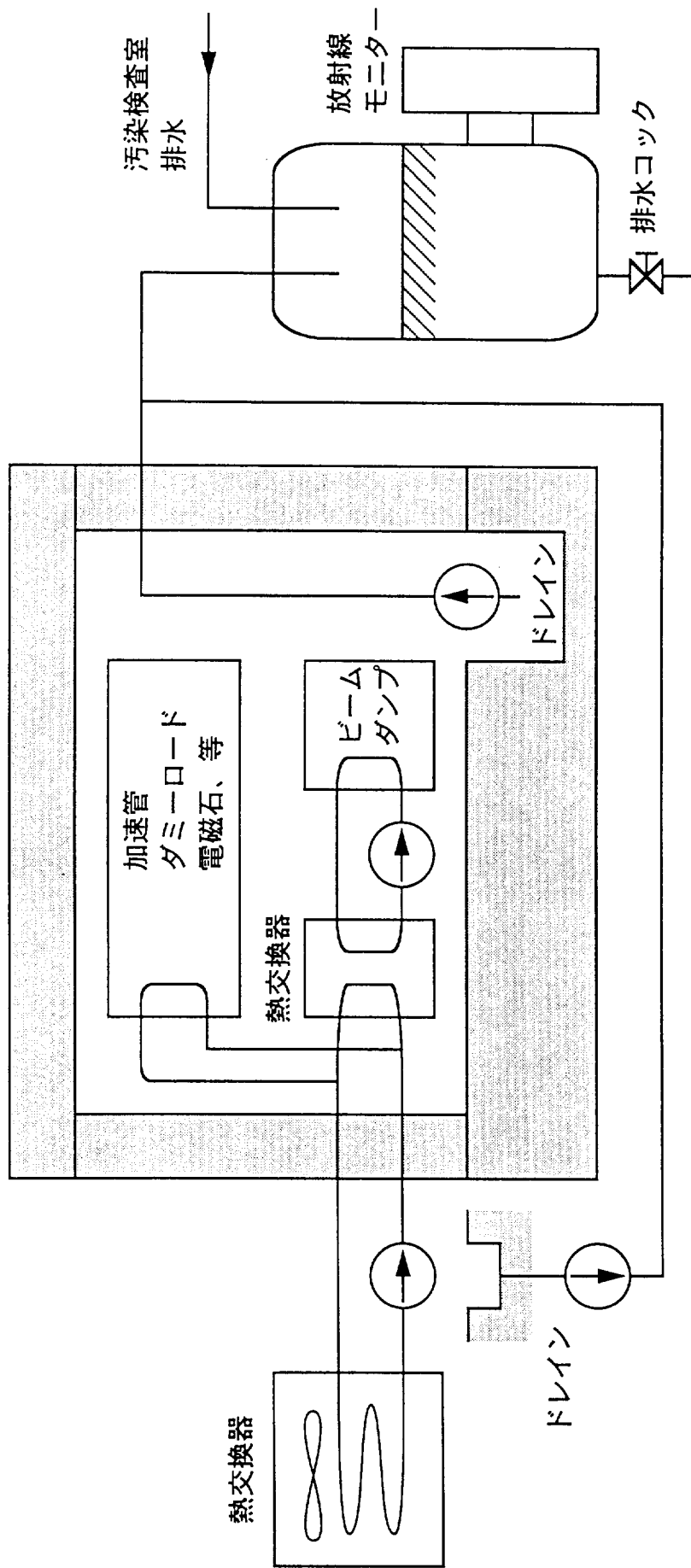


図 17: 冷却水および排水の系統図

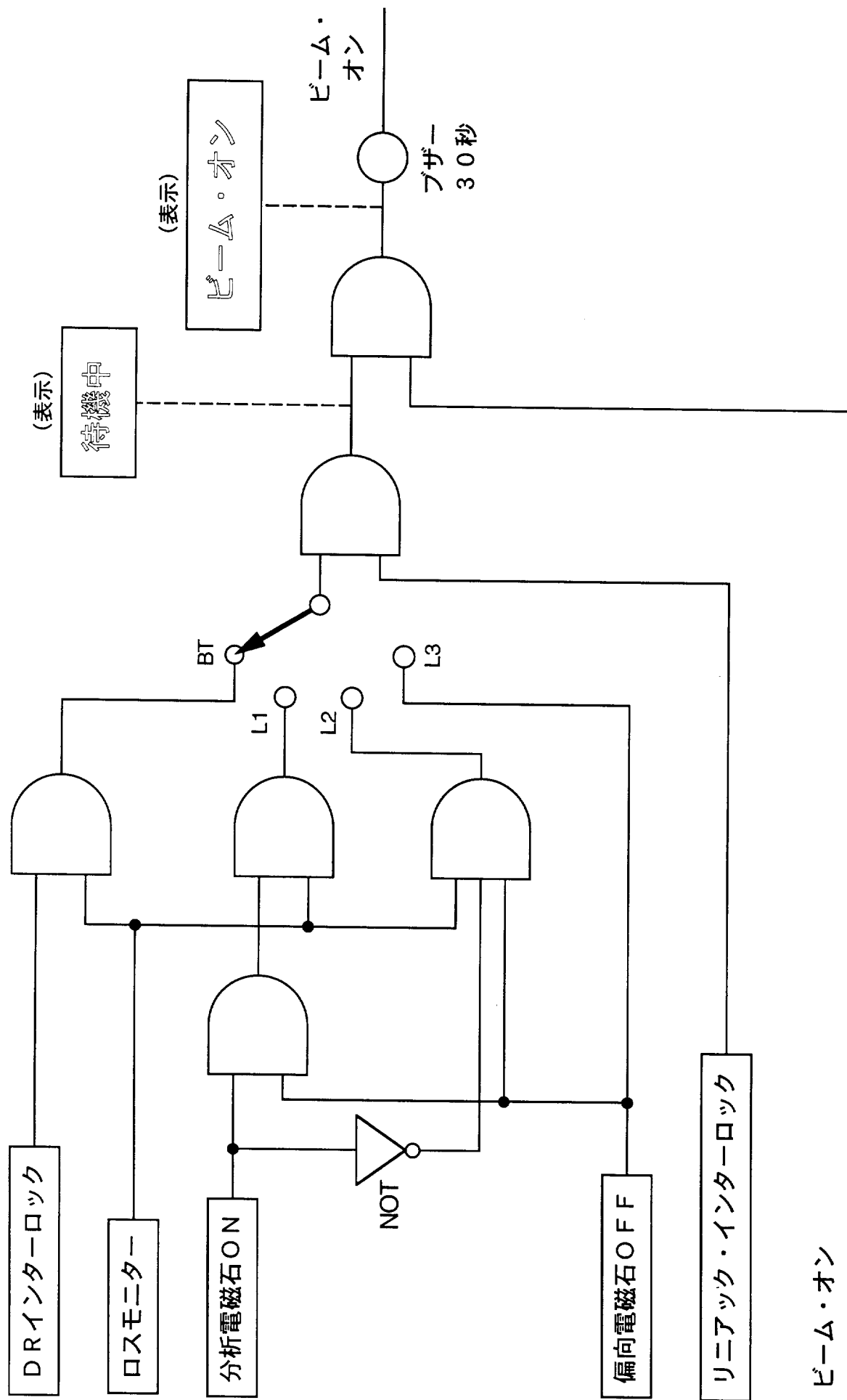


図 18: ビームインターロックシステム全体図 (変更前)

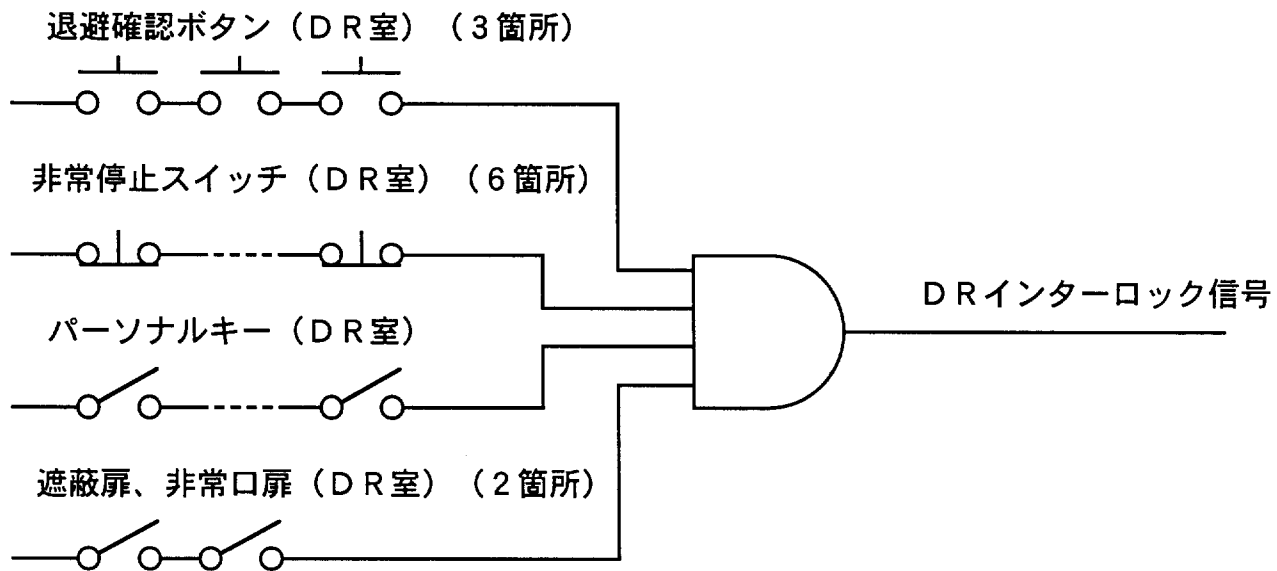


図 19: DR インターロック信号 (変更前)

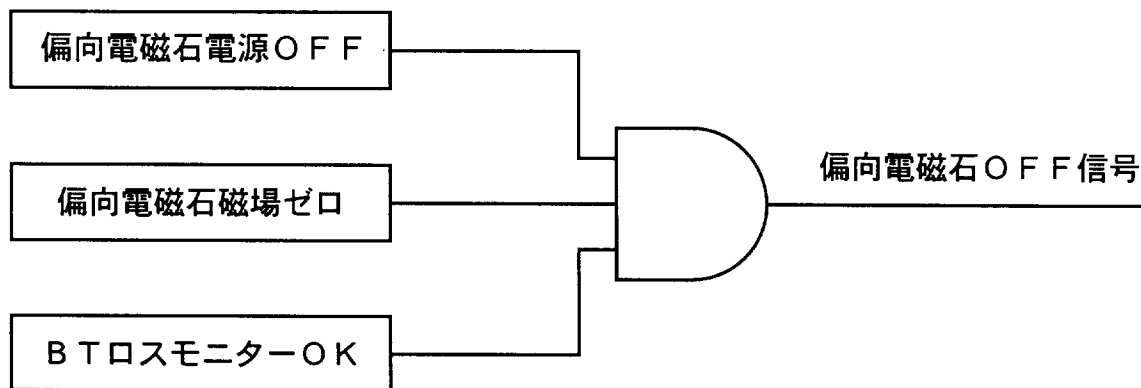


図 20: 偏向電磁石OFF信号 (変更前)

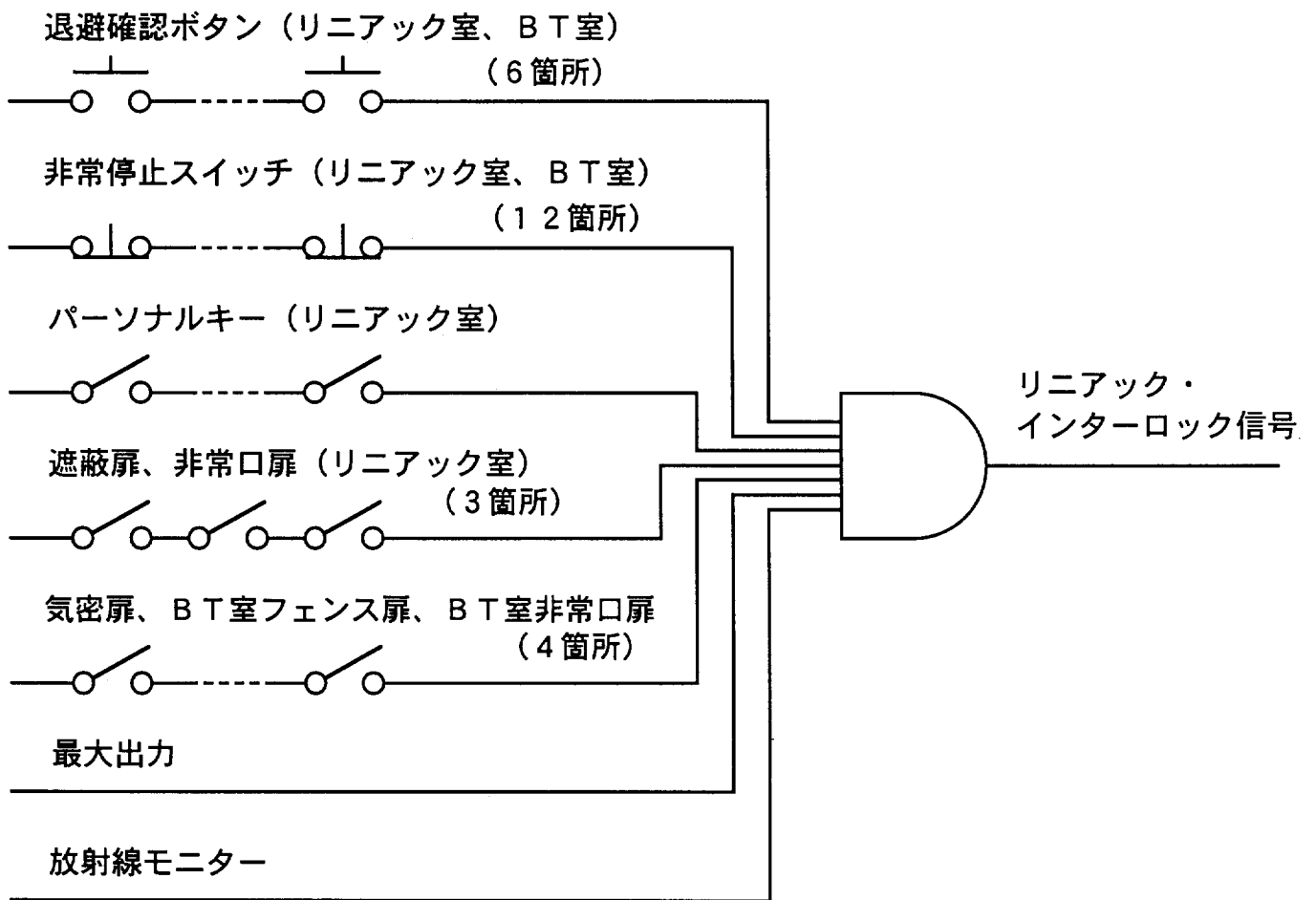


図 21: リニアック・インターロック信号 (変更前)

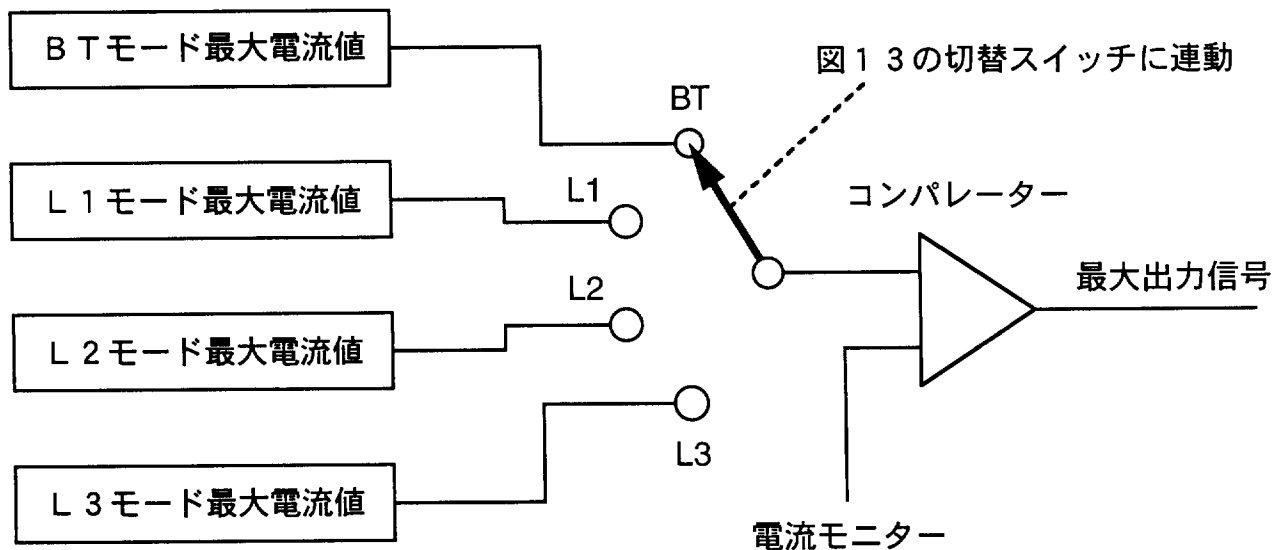


図 22: 最大出力インターロック回路 (変更前)

加速エネルギー $E_e \leq 1.54 \text{ GeV}$ の場合、表 2 に示す値が最大電流値として自動的に設定される。 $E_e > 1.54 \text{ GeV}$ の場合、表 2 に示す値の $1/2$ が最大電流値として自動的に設定される。

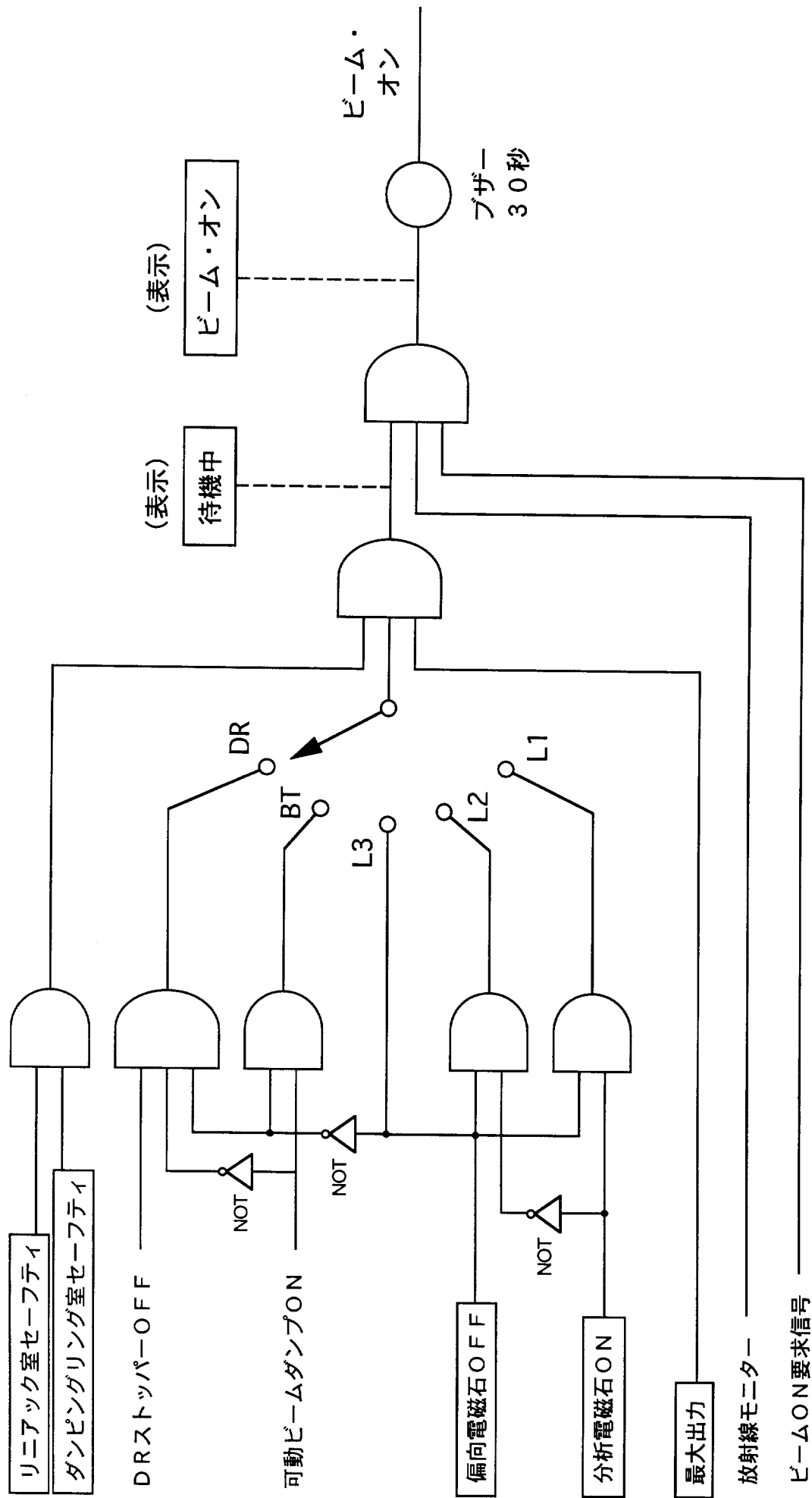


図 23: ビームインターロックシステム全体図 (変更後)

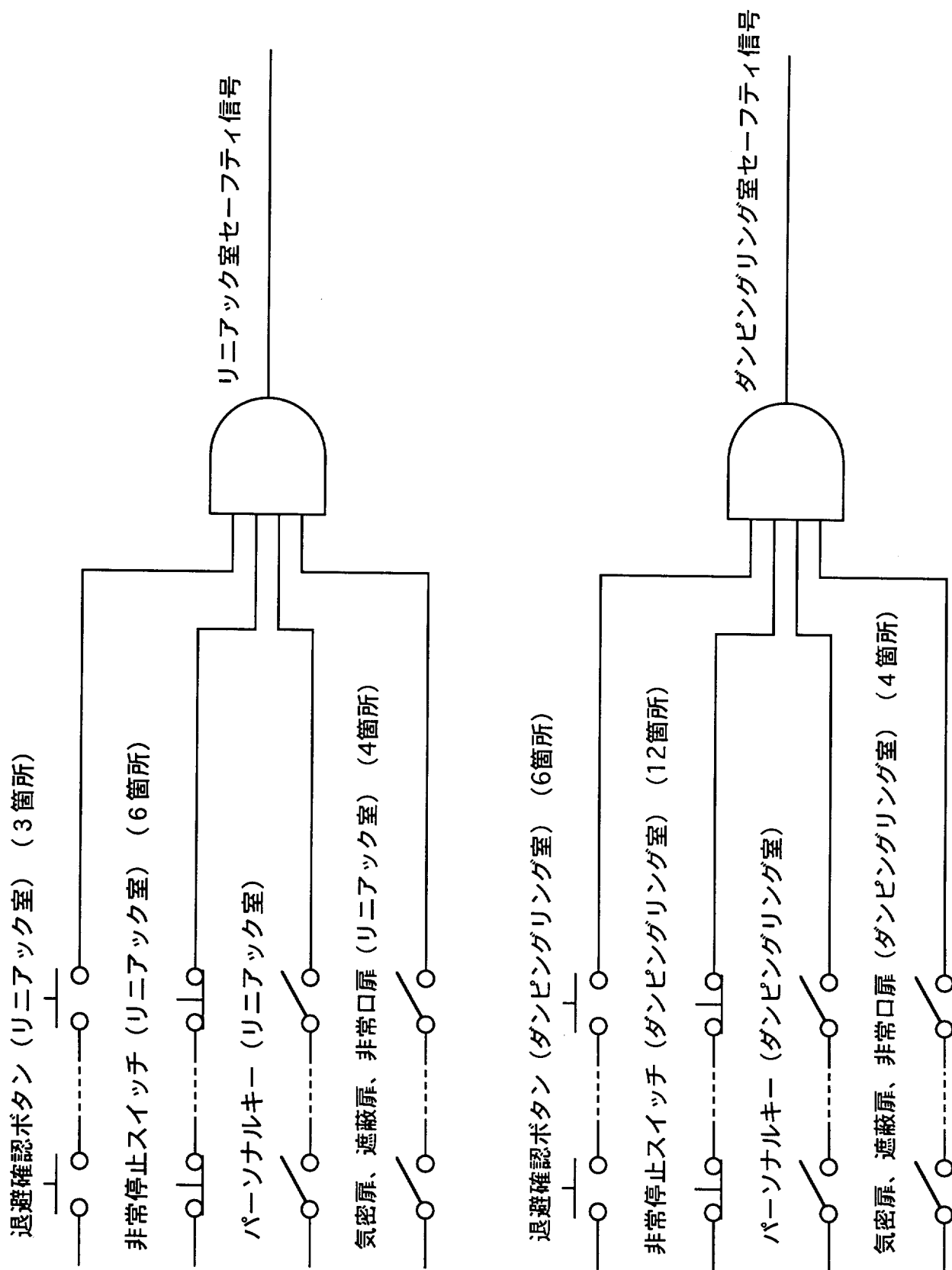


図 24: リニアックセーフティとダンピングリングセーフティ (変更後)

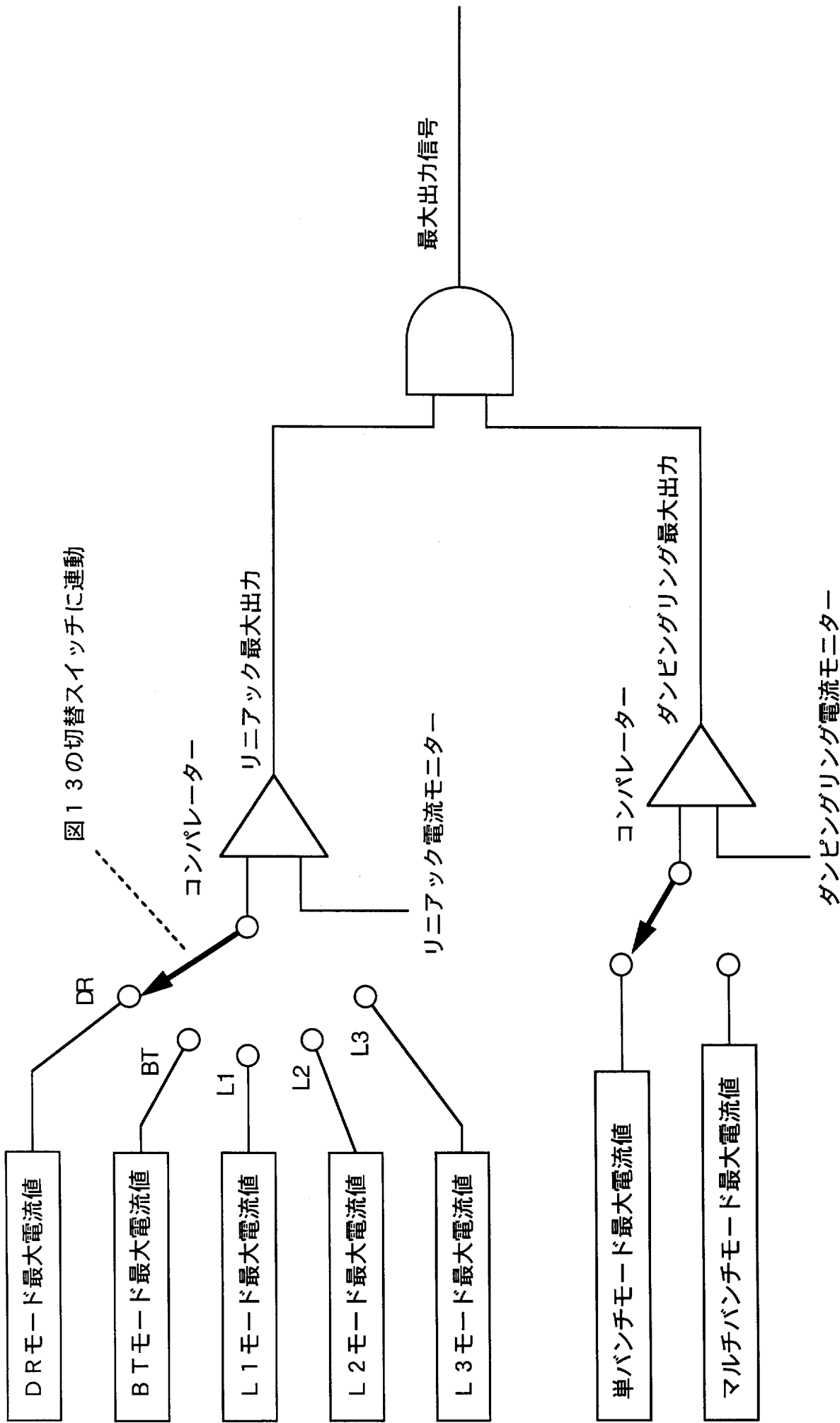


図13の切替スイッチに連動

図25: 最大出力信号 (変更後)

加速エネルギー $E_e \leq 1.54$ GeV の場合、表 2 に示す値が最大電流値として自動的に設定される。
 $E_e > 1.54$ GeV の場合、表 2 に示す値の $1/2$ が最大電流値として自動的に設定される。

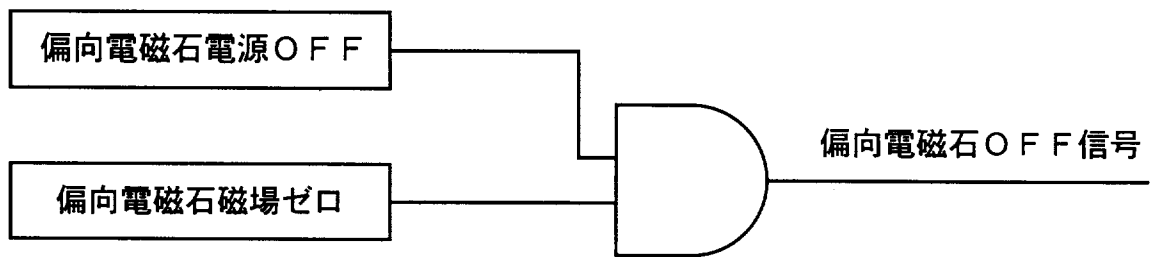


図 26: 偏向電磁石 OFF 信号 (変更後)