



## ITER中性粒子入射装置用直流 -1 MV 電源回路の過渡解析

Transient Phenomena Analysis of a DC-1MV Power Supply for the ITER NBI

山本 昌則 渡邊 和弘 山中 晴彦 武本 純平  
山下 泰郎 井上 多加志

Masanori YAMAMOTO, Kazuhiro WATANABE, Haruhiko YAMANAKA, Jumpei TAKEMOTO  
Yasuo YAMASHITA and Takashi INOUE

核融合研究開発部門  
核融合エネルギー工学研究開発ユニット

Division of Fusion Energy Technology  
Fusion Research and Development Directorate

August 2010

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

ITER 中性粒子入射装置用直流 -1 MV 電源回路の過渡解析

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門

核融合エネルギー工学研究開発ユニット

山本 昌則\*・渡邊 和弘・山中 晴彦・武本 純平\*・山下 泰郎\*・井上 多加志

(2010年6月17日受理)

ITER用中性粒子入射装置電源は、エネルギー 1 MeV で電流 40 A の負イオンビームを加速するための-1 MV 超高電圧直流電源システムである。日本原子力研究開発機構は ITER 国内機関 (JADA) として中性粒子入射装置電源の内、-1 MV 超高電圧発生部、冷却水絶縁供給用高電位デッキ 2、-1 MV 絶縁トランス、電力トランスミッションライン、サージ抑制機器、現地での電源試験のための機器等、主要な超高電圧機器を担当する。中性粒子入射装置においては、電源の負荷であるイオン源加速部で発生する放電破壊による負荷短絡が高い頻度で発生することが予想される。中性粒子入射装置を安定に動作させるためには、放電破壊時に電源からイオン源加速部へ流入するサージェネルギーを抑制し、イオン源加速部が放電破壊によって損傷されることを防ぐことが極めて重要である。このために、電源回路にはサージ抑制機能が必要となる。ITER 中性粒子入射装置電源のサージ特性について、最新の ITER サイト機器配置等の諸条件を考慮した等価回路を作成し、回路解析コード EMTDC を用いてサージ抑制機器の最適化設計を行った。サージ抑制機器の配置や定数の選定により、リターンライン保護抵抗・中間電位保護抵抗の最適化を行い、トランスミッションライン 2 と 3 にサージブロッカーを振り分け、設置スペースが厳しいトカマク建屋内のサージブロッカーを小さくする検討を行った。その結果、設置スペースに対応した上で、放電破壊の際のイオン源加速部への流入エネルギーを ITER の規定値 50 J に対し 25 J 程度以下に抑制できることを確認した。

---

那珂核融合研究所 (駐在) : 〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

\*技術開発協力員

\*株式会社 日立製作所

Transient Phenomena Analysis of a DC -1 MV Power Supply for the ITER NBI

Masanori YAMAMOTO<sup>✱</sup>, Kazuhiro WATANABE, Haruhiko YAMANAKA, Jumpei TAKEMOTO<sup>✱</sup>,  
Yasuo YAMASHITA<sup>\*</sup> and Takashi INOUE

Division of Fusion Energy Technology  
Fusion Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received June 17, 2010)

A power supply for the ITER Neutral Beam Injector (NBI) is a DC ultra-high voltage (UHV) power supply to accelerate negative ion beams of 40 A up to an energy of 1 MeV. Japan Atomic Energy Agency as the Japan Domestic Agency for ITER contributes procurement of dc -1 MV main components such as step-up -1 MV transformers rectifiers, a high voltage deck 2, a -1 MV insulating transformer, a transmission line, a surge reduction system and equipments for site test. Design of the surge suppression in the NBI power supply is one of the key issues to obtain the stable injector performance. This report describes the design study using EMTDC code on the surge suppression by optimizing the core snubber and additional elements in the -1 MV power supply. The results show that the input energy from the stray capacitance to the accelerator at the breakdown can be reduced to about 25 J that is smaller than design criteria for ITER.

Keywords: ITER, Neutral Beam Injector, -1 MV Power Supply, UHV, Surge Reduction, Circuit Analysis, Breakdown

---

<sup>✱</sup>Collaborating Engineer

<sup>\*</sup>Hitachi Co. Ltd

目次

1. はじめに	1
2. ITER NBI 電源の基本仕様	2
2.1 回路構成、機能および回路図	2
2.2 仕様	3
2.3 配置案	7
2.4 トランスミッションライン内の配置案	9
2.5 等価回路モデル	13
3. サージ抑制のための回路検討	14
3.1 初期等価回路構成での検討	14
3.2 ダイオードモデル、中間電位保護抵抗、 リターンライン保護抵抗を追加した場合の検討	18
3.3 絶縁トランス 2 次側ケーブルインダクタンス および絶縁トランス静電容量の検討	21
3.4 中間電位保護抵抗設置位置の検討	23
3.5 外管と内管の芯がずれた導体および並行で径の異なる導体 の静電容量計算方式検討	25
3.6 トランスミッションラインの長さ変更、高電圧ブッシングの定数、 リターンライン抵抗等を考慮した検討	31
3.7 最適化の検討	43
3.8 検討結果	59
4. まとめ	59
謝辞	60
参考文献	60

Content

1. Introduction	1
2. Basic specifications of ITER NBI power supply	2
2. 1 Specifications	2
2. 2 Layout plan	3
2. 3 Transmission line layout plan	7
2. 4 Connection diagram	9
2. 5 Equivalent circuit model	13
3. Study on the circuit for surge suppression	14
3. 1 Analysis of the original circuit	14
3. 2 Analysis with the diode element model, intermediate electric potential protection resistances and a return line protection resistance	18
3. 3 Analysis with an inductance of the secondary cable and the capacitance of the insulating transformer	21
3. 4 Study on the position of the resistors for the intermediate potential protection lines	23
3. 5 Study on the capacitance model for the transmission line conductors	25
3. 6 Analysis with modification of the transmission line length, the HV bushing and a return line resistance	31
3. 7 Study on the optimization	43
3. 8 Results of the analysis	59
4. Summary	59
Acknowledgments	60
References	60

## 1. はじめに

ITER 用中性粒子入射装置電源は、1 MeV, 40 A の重水素負イオンビームを最長 3600 秒[1] 発生させるための超高圧直流電源システムである。中性粒子入射装置 (NBI) では、負荷であるイオン源加速器において電源にとっては短絡現象である放電破壊が高い頻度で発生する可能性がある。放電破壊によってイオン源加速器が損傷を受けると、耐電圧が低下し安定なビーム出力が困難になる。そこで、NBI を安定に動作させるためにはイオン源加速器で発生する放電破壊の際に、電源からイオン源加速器へ流入するサージエネルギーやブレークダウン電流を抑制することが極めて重要である。そのため、イオン源加速器への流入エネルギーを吸収させるための磁性体コアと二次抵抗で構成されるサージブロッカー等が用いられる。

ITER では、トカマク建屋内にトランスミッションライン (電源の超高電圧発生器からイオン源加速部へ電源を供給する伝送管) の終端部と冷却水を絶縁供給するための高電位デッキ 2 を設置するが、設置スペースが狭く、必要量のサージブロッカーをイオン源加速器近傍に設置することが困難な状況になっている。

そこで、制限されたレイアウト条件の中で、最適なサージ抑制機能を持たせるために、最新のサイト機器配置等の諸条件を考慮し、回路解析コード EMTDC (Electromagnetic Transients including DC) [2] を用いてサージ抑制機器の定数、配置について以下の検討を行った。

- ① 回路定数を実体機器に近付けるよう見直す。
- ② 導体間静電容量計算に、最新導体構造を反映させる。
- ③ サージブロッカーを高電位デッキ 2 の前後へ分配する。(サージブロッカーの一部をトカマク建屋外に設置する。)
- ④ 電源リターンライン (トランスミッションラインの外管がリターンラインの役目をもっている) にエネルギー吸収用の抵抗挿入を検討する。
- ⑤ 中間電極保護抵抗 (-800 kV、-600 kV、-400 kV、-200 kV の各導体の電流を抑えるための抵抗) の設置位置を変更する。
- ⑥ レイアウト制限によるサージブロッカーの設置位置変更にもなう回路定数を見直す。
- ⑦ 高電圧ブッシング (トランスミッションラインとイオン源加速器とをつなぐための設備) の静電容量、インダクタンス定数を追加する。

などがある。

本報告では、まず、電源の基本仕様について示し、機器レイアウト変更に関する回路定数の見直しと、サージ解析による検討結果について述べる。

## 2. ITER NBI 電源の基本仕様

### 2.1 回路構成、機能および回路図

ITER NBI 電源はNBIイオン源および加速器に電源を供給する装置である。低圧部分をEU が担当し、高圧部分を日本が担当することになっている。NBI 電源の回路図を図 2.1-1 に示す [3] [4]。

NBI電源は大きく分けて、負イオンを1 MeV に加速するための超高压電源である加速器電源 (Accelerator Grid Power Supply:AGPS)と負イオン源において負イオンを生成させるための電源 (Ion Source and Extractor Power Supply:ISEPS)から構成されている。

AGPSは、低電圧側での高速制御によって-1 MVの高電圧電源出力の制御と高速スイッチングを行うインバータ方式のNB 電源であり日本が提案した方式である[5]。AGPS では商用周波数をコンバータで直流に変換し、その直流からインバータで 150 Hzの矩形波を作る。それを変圧整流器によって-1 MVを発生させる。EUはコンバータとインバータの低電圧部を担当し、変圧整流器以降を日本が担当する。変圧整流器では、150 Hzの矩形波を昇圧トランスにて電圧を上げ、ダイオードにて3相全波整流を行い、-200 kVを得る。-200 kV出力の変圧整流器の直流出力を5段直列接続し-1 MVを発生させる。-1 MVおよび各段の電位をDC フィルターにて平滑化し、トランスミッションラインにてイオン源加速器に送電する。トランスミッションラインにはサージ抑制用のサージブロッカーが設けられる。また、イオン源加速器の冷却水を絶縁供給するための高電位デッキ 2 (HVD2)が設けられる。これらの高電圧機器を日本が担当する。

ISEPSは負イオンを生成し引き出すための種々の低電圧電源であるが、負イオンを-1 MVの高電位上で生成するためこれらの電源は大地から-1 MVで絶縁する必要がある。このため ISEPS 電源は高電位デッキ1 (HVD1)と呼ばれる絶縁架台上に設置される。これら HVD1 全体はEU 分担であるが、HVD1 に-1 MVの絶縁をもつ交流電力を供給する絶縁トランスは日本が担当する。

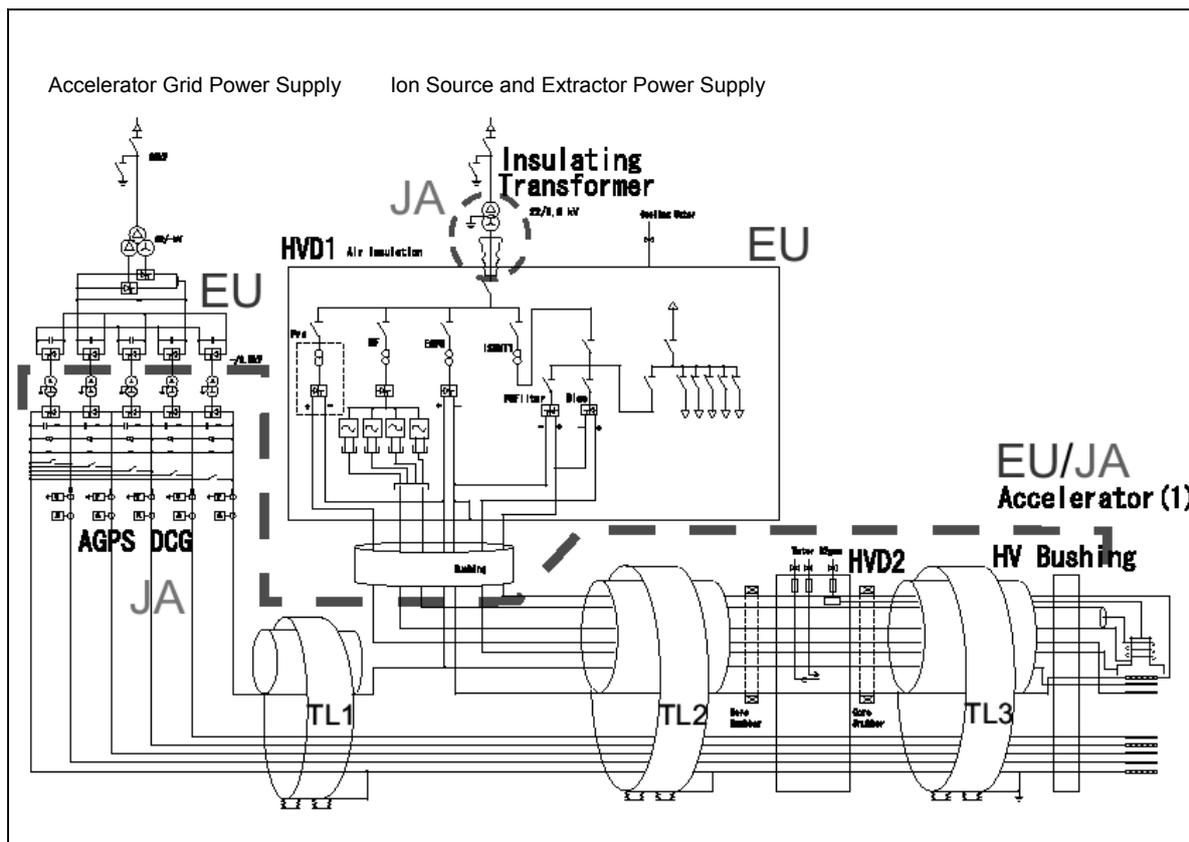


図 2.1-1 回路図

## 2.2 仕様

全体仕様および日本が担当する機器仕様を下記に示す。

### 2.2.1 全体仕様

出力電圧	: -1 MV 直流
出力電流	: 59 A (-1 MV 導体)
ビーム電流	: 40 A (D-)
パルス幅	: 3600 秒 (最大)
構成	: -200 kV 直流発生器×5 段 直列
リップル	: 10%p-p 以下
立上時間	: 80 ms 以下
再立ち上げ休止時間	: 50 ms 以下
遮断時間	: 200 $\mu$ s 以下
過電圧	: 110%
放電破壊時のビーム源への流入エネルギー	: 50 J 以下

### 2.2.2 昇圧トランス(5 台 1 セット)

インバータ、コンバータ(EU担当)からの 150 Hz [3] の高周波矩形波電圧を昇圧し、整流器出口で直流-1 MV を得るためのトランスである。

昇圧トランスは屋外設置となる。

1次電圧	: 6.5 kV
結線	: Δ(1次) / Y(2次)
周波数	: 150 Hz
絶縁および冷却	: 油入り / 空冷

### 2. 2. 3 整流器(5台1セット)

昇圧トランスからの交流電源をダイオードにて3相全波整流し、各-200 kVの直流を発生させる整流器である。5台の整流器の出力を直列につなぎ、-1 MVを得る。

また、中間電位(-800 kV、-600 kV、-400 kV、-200 kV)もイオン源加速器へ供給する。整流器は昇圧トランスの上部に位置し、屋外設置となる。

出力電圧	: 各段-200 kV 直流
整流方法	: 3相全波整流
絶縁および冷却	: SF <sub>6</sub> ガス(ガス圧力0.6 MPa) / 外部にてSF <sub>6</sub> ガスを冷却水と熱交換

### 2. 2. 4 高電位デッキ2

高電位デッキ2(HVD2)はイオン源加速器用の純水冷却水を絶縁して-1 MV、-800 kV、-600 kV、-400 kV および-200 kVの各電位に供給するためのウォータチョークである。また、イオン源への燃料ガス(D<sub>2</sub> またはH<sub>2</sub>)の供給を行う。燃料ガス供給系には、導入バルブ開閉用のSF<sub>6</sub>ガス管と、それに併設される高電圧ブッシングからの圧縮空気排気管がある。これらは、対地および各電位間が絶縁される。ウォータチョークはセラミック管または樹脂管で構成され、各電位毎に往復管路となる。冷却水は純水(5 MΩ・cm@25°C)が使用される。HVD2内には0.6 MPaのSF<sub>6</sub>ガスが封入され各電位間および大地間が絶縁される。HVD2はトランスミッションライン3(TL3)に接続される。ウォータチョークはTL3の各電位の配管に接続され、冷却水はイオン源加速器に供給される。燃料ガスの開閉用のバルブはTL3との接続近辺、すなわち、-1 MV電位上に設けられる。バルブは圧縮空気駆動型であり、空気の代わりにSF<sub>6</sub>ガスにて駆動される。開閉用のバルブは2並列2直列で構成される。HVD2はトカマク建屋内に設置される。

冷却水供給	: -1 MV / -800 kV / -600 kV / -400kV / -200 kV の電位の異なる各系統へ絶縁して冷却水を供給する。
冷却水注入温度	: 15°C(35°Cに変更の可能性あり)
燃料ガス	: D <sub>2</sub> (または H <sub>2</sub> )
バルブ動作用ガス	: SF <sub>6</sub> ガス
絶縁	: SF <sub>6</sub> ガス (ガス圧力0.6 MPa)

### 2. 2. 5 -1 MV 絶縁トランス

イオン源で負イオンを生成するための各種電源が設置される高電位デッキ1(HVD1:H

VD1はEU担当)は、-1 MVの高電位上で負イオンを生成するために全体が-1 MVに浮かされる。このHVD1に交流電力を供給する設備が絶縁トランスである。絶縁トランスはHVD1と同じ建屋である建屋 37 内に設置される。本絶縁トランスは、一次巻線と二次巻線間に直流-1 MVの絶縁を有するものである。一次回路は三相交流 22 kVを受電し 6.5 kVの二次回路出力をHVD1に供給する。中性点はHVD1に電位固定されるため、二次出力は、加速電源によって-1 MVの電位に充電される。本絶縁トランスの二次巻線出力は、大気絶縁となるHVD1に接続されるために、トランスの二次巻線出力部には油-大気絶縁型の-1 MVブッシングが用いられる。

電圧	: 22 kV(1次) / 6.5 kV(2次)
結線	: Δ(1次) / Y(2次)
周波数	: 60 Hz
絶縁および冷却	: 油入 / 空冷
ブッシング高さ	: 約 16 m(予定)
ブッシング内絶縁	: 油、SF <sub>6</sub> ガス
ブッシング外絶縁	: 大気絶縁(必要な距離を確保する)

## 2. 2. 6 DC フィルタータンク

DC フィルタータンクには、各整流器からの直流出力電圧を平滑化するためのコンデンサーが設置される。また、タンク内には電源運転停止時にフィルターコンデンサを接地するための接地装置、運転中に加速電源の電圧電流出力の計測を行う電圧電流計測装置が設置される。下記にDC フィルタータンクの機器構成を示す。

- ◆ 各段出力の電圧リップル平滑化と過電圧抑制用としてコンデンサー(各電位間に約 0.3 μF) [3] とコンデンサーへの直列抵抗(各電位間に約 68 Ω)。
- ◆ 安全のための放電接地装置。
- ◆ 各電位における電流計測装置。
- ◆ 各ラインの対地電圧を測定する電圧計測装置。

接地装置は、機械的に接地を確実にできる構造であり、その状態指示がDC フィルタータンク外部から目視できる機構を有している。計測系は、光送信器を有し、接地電位である制御室に設ける信号受信器に光変換で信号を送るものである。DC フィルタータンクには各整流器からの伝送管と高電位ブッシングに送電するためのトランスミッションラインが接続されている。

DC フィルタータンクまたはトランスミッションライン 1 には試験用電源が接続される。

絶縁および冷却	: SF <sub>6</sub> ガス(ガス圧力 0.6 MPa) / 外部に設けられる SF <sub>6</sub> ガス冷却装置でガスを冷却
---------	----------------------------------------------------------------------------

## 2. 2. 7 トランスミッションライン

トランスミッションラインとはDC フィルタータンクから高電圧ブッシングをつなぐ伝送管である。外管はイオン源加速器からの電気の戻りであるリターンラインの役目を持っている。

内部に各電位(-1 MV,-800 kV,-600kV,-400kV,-200 kV)の送電を行う導体が設置されている。各電位の導体は外管より碍子等で放電が起きないように距離を離し、支持されている。

DC フィルタータンクから高電位デッキ1 (HVD1) のブッシングへ至るトランスミッションラインの一部をトランスミッションライン 1 (TL1) と呼ぶ。外管途中に位置調整用ベローズが設けられる。内部は SF<sub>6</sub> ガスが充填されるが、DC フィルタータンクとの間にはディスクブッシングを設け、前後のセクションを隔離している。本ディスクブッシングの位置において外管の絶縁を行い、外管にケーブルを接続し、そのケーブルは保護抵抗を通して直流発生器 (DCG) の接地側端子に接続される。DC フィルタータンクの外管と DCG の匡体などはトランスミッションラインとは別にして機器接地端子に接続する。TL1 側はトカマク本体の接地の1点接地となっている。HVD1 のブッシングと HVD2 間の部分をトランスミッションライン 2 (TL2) と呼ぶ。TL1 と TL2 間にはブッシング等を設けず SF<sub>6</sub> ガスが共有されている。

外管内径	: 1500 mm (材質:SS400、厚み:12 mm 仮定)
-1 MV 導体	: 267.4 mm (材質:AL、厚み:3 mm 仮定)
-800 kV 導体	: 100 mm (材質:AL、厚み:3 mm 仮定)
-600 kV 導体	: 80 mm (材質:AL、厚み:3 mm 仮定)
-400 kV 導体	: 80 mm (材質:AL、厚み:3 mm 仮定)
-200 kV 導体	: 80 mm (材質:AL、厚み:3 mm 仮定)
絶縁	: SF <sub>6</sub> ガス (ガス圧力 0.6 MPa)

TL2には HVD1 からの負イオン生成電源の出力導体やケーブルが-1 MV 導体の中を通る構造となっている。トランスミッションライン3 (TL3) 側にサージブロッカーおよび保護抵抗が設けられる。本来、負荷の直前である TL3にサージブロッカーを全て設ける方が良いが、スペースの制限から不可能であるため、TL2 にもサージブロッカーを設けている。外管途中に地震対策用ベローズが設けられる。内部は SF<sub>6</sub> ガスが充填されるが、TL2 と TL3 間にはディスクブッシングを設け、隔壁としている。本ディスクブッシングはトカマク建屋内に設置される機器内部の SF<sub>6</sub> ガスを建屋外部に設置される機器内部に出さないための設備である。

外管内径	: 1690 mm (材質:SS400、厚み:12 mm 仮定)
外管内径	: 2370 mm (サージブロッカー部)
-1 MV 導体	: 409.8 mm (材質:AL、厚み:9.5 mm 仮定)
-800 kV 導体	: 100 mm (材質:AL、厚み:3 mm 仮定)
-600 kV 導体	: 80 mm (材質:AL、厚み:3 mm 仮定)
-400 kV 導体	: 80 mm (材質:AL、厚み:3 mm 仮定)
-200 kV 導体	: 80 mm (材質:AL、厚み:3 mm 仮定)
サージブロッカー	: 930 mm (外形)/558 mm (内径)/35 mm 厚み×84 枚
絶縁	: SF <sub>6</sub> ガス (ガス圧力 0.6 MPa)

HVD2 と高電圧ブッシングに至る部分をトランスミッションライン 3 (TL3) と呼ぶ。HVD2 からの冷却水、燃料ガスおよび高電圧ブッシング用圧縮空気排気管は-1 MV 導体内に設

けられる。中間電位(-800 kV,-600 kV,-400 kV,-200 kV)供給用導体は冷却水配管としても使用し、HVD2 の接地電位から供給される純水冷却水は、絶縁機構であるウォータチョークを介して高電位部に供給され、ビーム源まで導かれる。冷却水配管は往復必要なため、各電位に2本ずつ設置される。-1 MV 導体の配管途中(イオン源加速器側)にサージブロッカーが設けられる。TL3 外管の途中に位置調整用ベローズを設ける予定である。

外管内径	: 2090 mm(材質:SS400、厚み:15 mm 仮定)
外管内径	: 2370 mm(サージブロッカー部)
-1 MV 導体	: 609.6 mm(材質:AL、厚み:9.5 mm 仮定)
-800 kV 導体	: 100 mm(材質:SUS304、厚み:3 mm 仮定)
-600 kV 導体	: 100 mm(材質:SUS304、厚み:3 mm 仮定)
-400 kV 導体	: 100 mm(材質:SUS304、厚み:3 mm 仮定)
-200 kV 導体	: 100 mm(材質:SUS304、厚み:3 mm 仮定)
サージブロッカー	: 930 mm(外形)/600 mm(内径)/35 mm 厚み×30 枚
絶縁	: SF <sub>6</sub> ガス (ガス圧力 0.6 MPa)

### 2.3 配置案

初期のトカマク建屋外レイアウト(NBI 電源近傍)を図 2.3-1 に示す。

図中に示した HNB1~3 は1号機~3号機を示すものである。

トランスミッションラインの長さは HNB2(2号機)を用いて検討している。

初期のトカマク建屋内レイアウト 3D イメージ図を図 2.3-2 に示す。

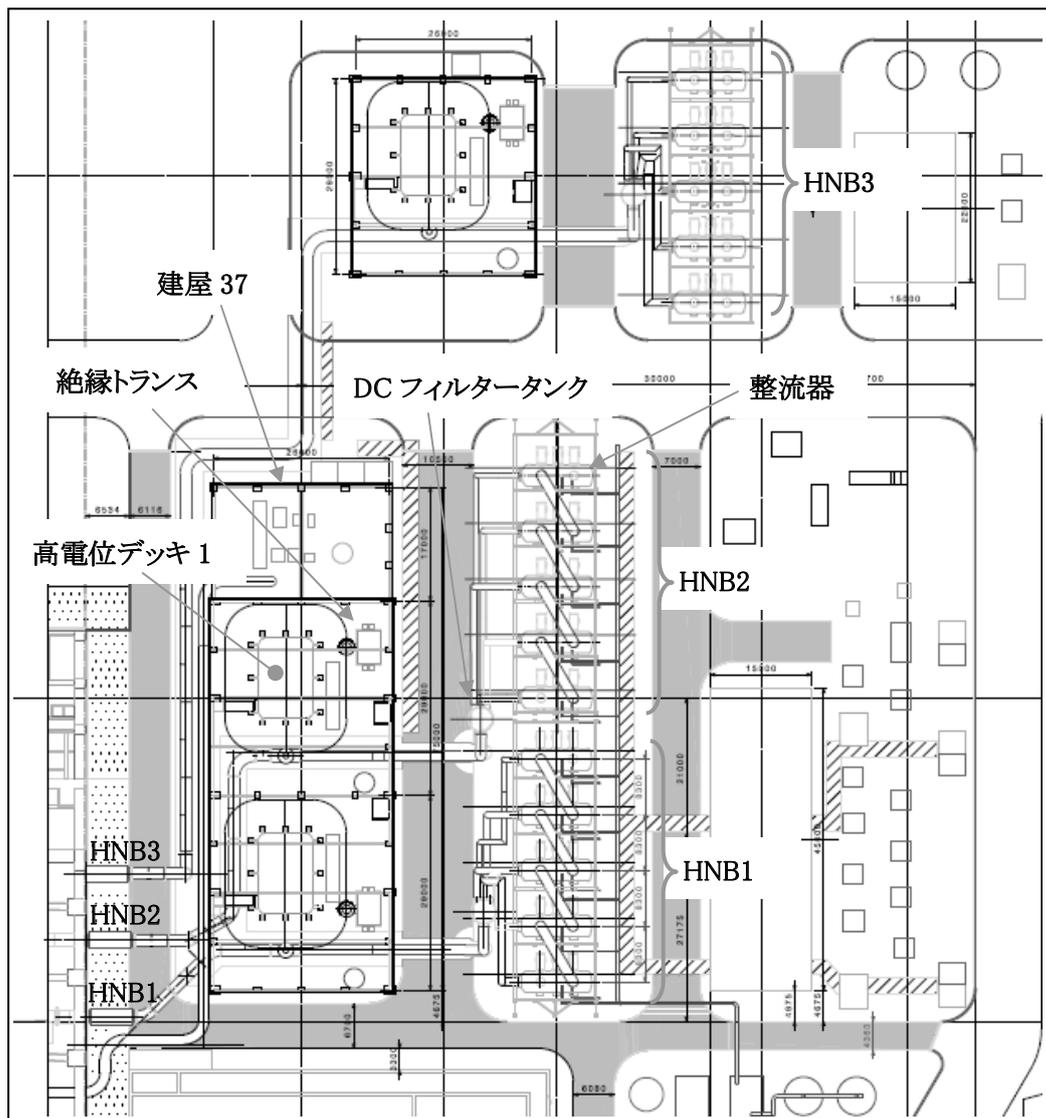


図 2.3-1 トカマク建屋外レイアウト

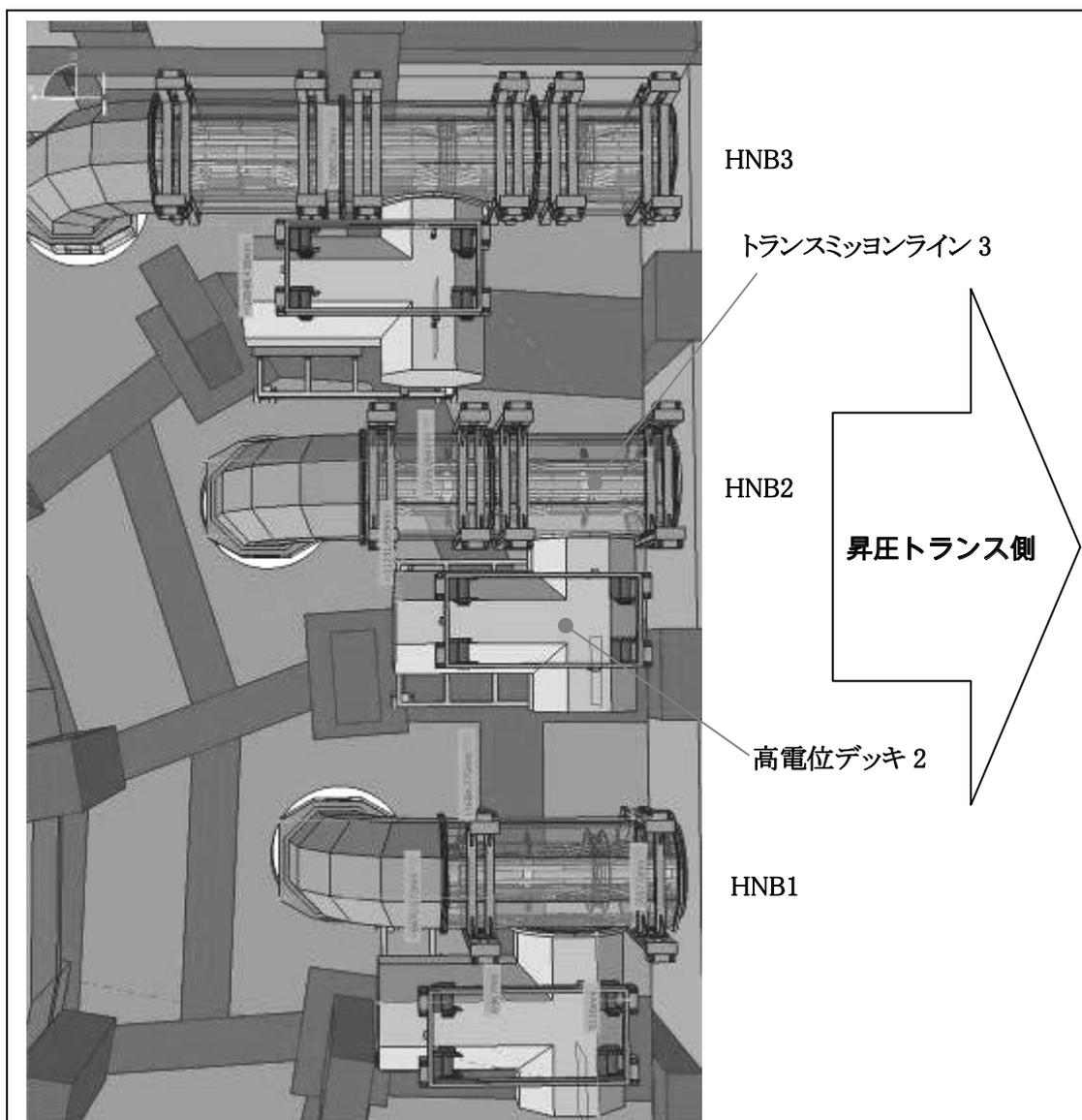


図 2.3-2 トカマク建屋内レイアウト 3D イメージ図

#### 2.4 トランスミッションライン内の配置案

トランスミッションライン内の導体寸法、構造、配置はトランスミッションラインの位置によって異なる。トランスミッションラインの概略の構造を図 2.4-1 に示す。(トカマク建屋、建屋 37 は省略されている。)

図 2.4-2、3、4、5 に各位置(TL1-A、TL2-A、TL2-B、TL2-C、TL2-D、TL3-A、TL3-B、TL3-C)でのトランスミッションライン内の配置案を示す。

図 2.4-2、3、4、5 の中の番号の説明を表 2.4-1 示す。

表 2.4-1 図 2.4-2、3、4、5 の図中番号の説明表

No.	項目
1	外管(リターンライン)
2	中間電位導体(-800 kV、-600 kV、-400 kV、-200 kV)
3	中間電位導体用絶縁碍子
4	-1 MV 導体用絶縁碍子
5	負イオン生成電源の送電線(PG フィルター、バイアス等)
6	負イオン生成電源の送電線(RF)
7	-1 MV 導体
8	冷却水配管
9	サポート
10	サージブロッカー(コア)
11	サージブロッカー(抵抗)
12	サージブロッカー(リアクター)

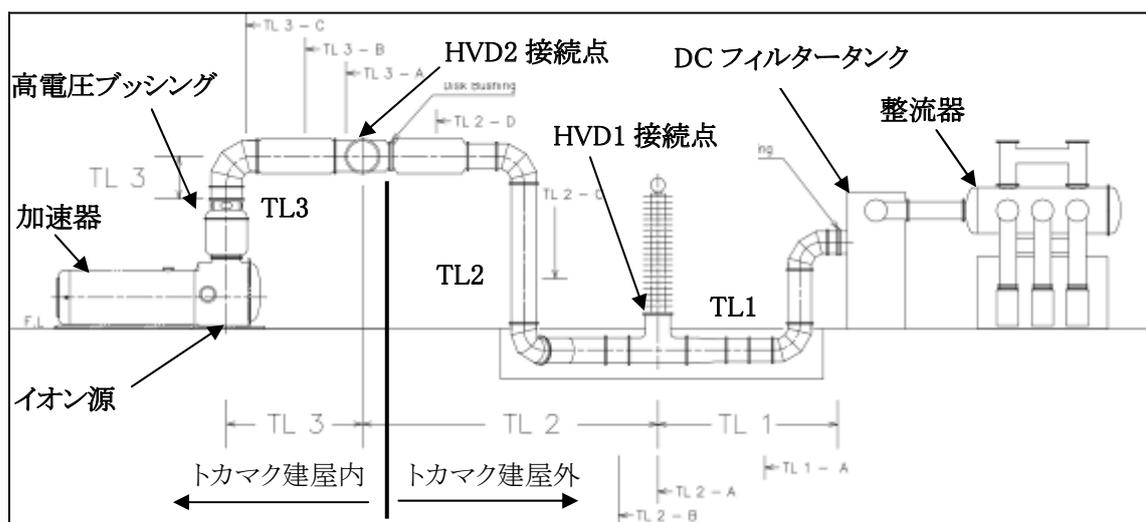


図 2.4-1 概略位置図

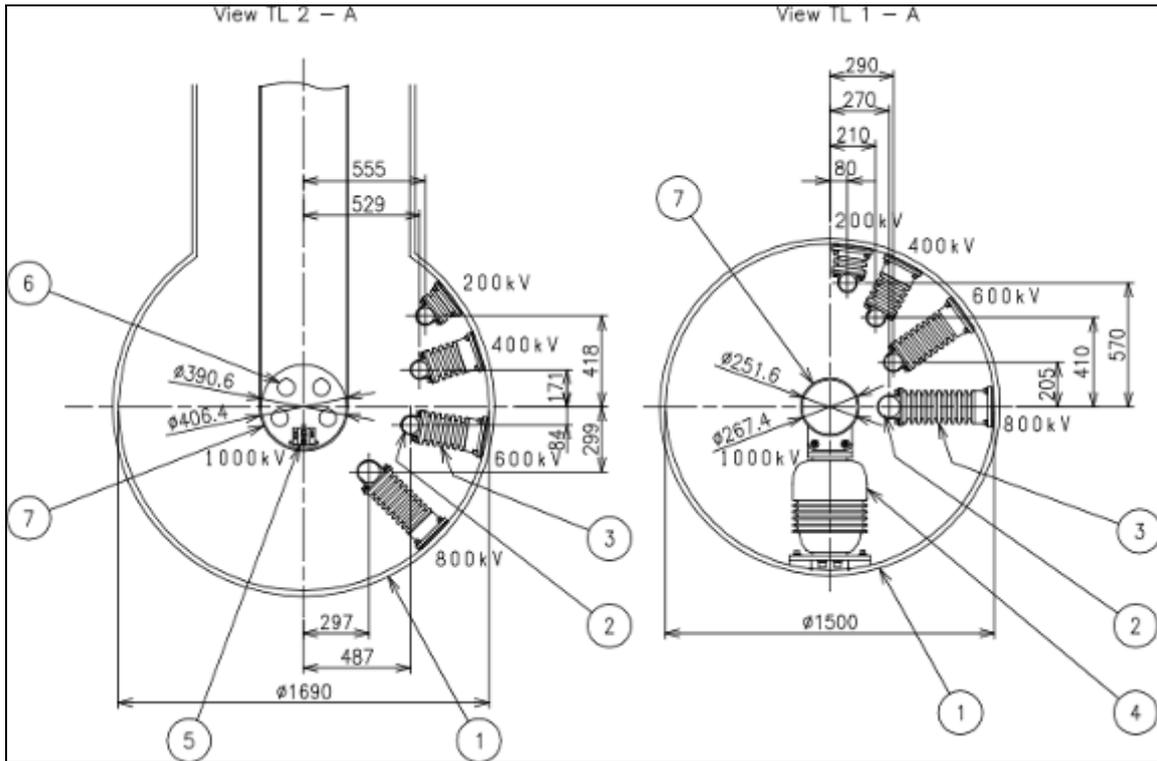


図 2.4-2 トランスミッションライン内の配置案 (TL1-A、TL2-A)

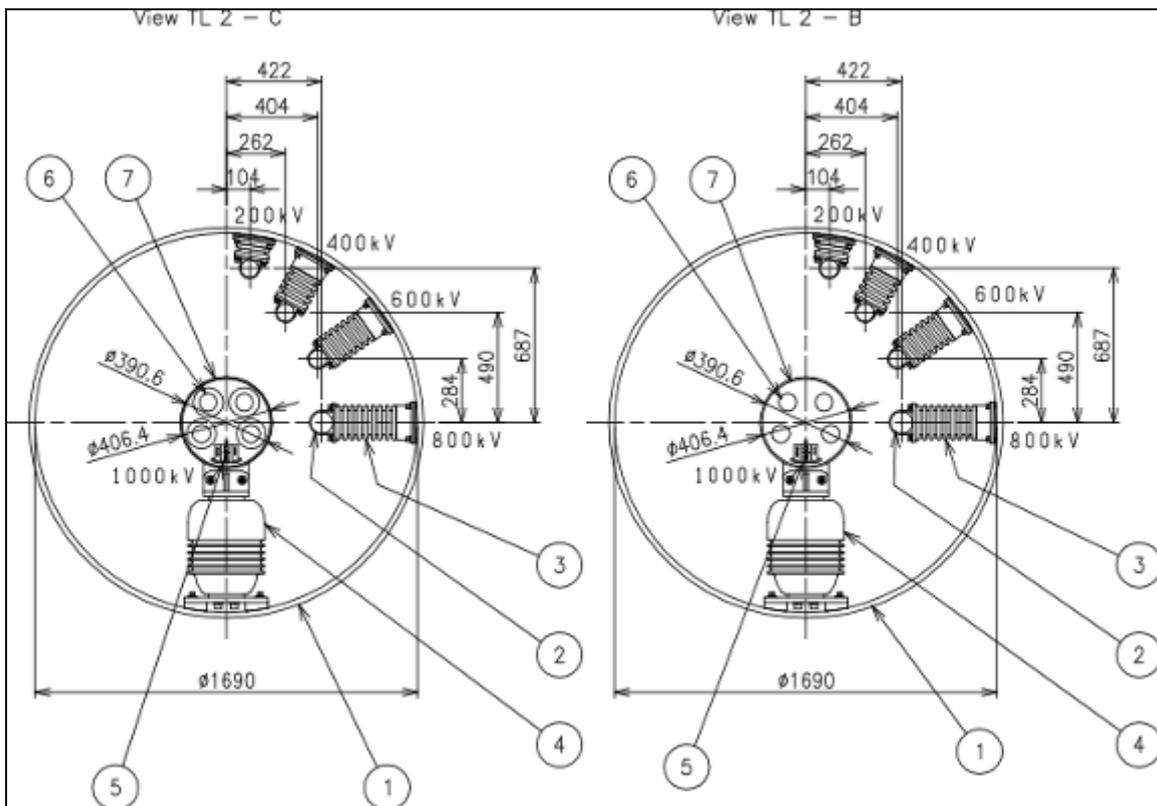


図 2.4-3 トランスミッションライン内の配置案 (TL2-B、TL2-C)

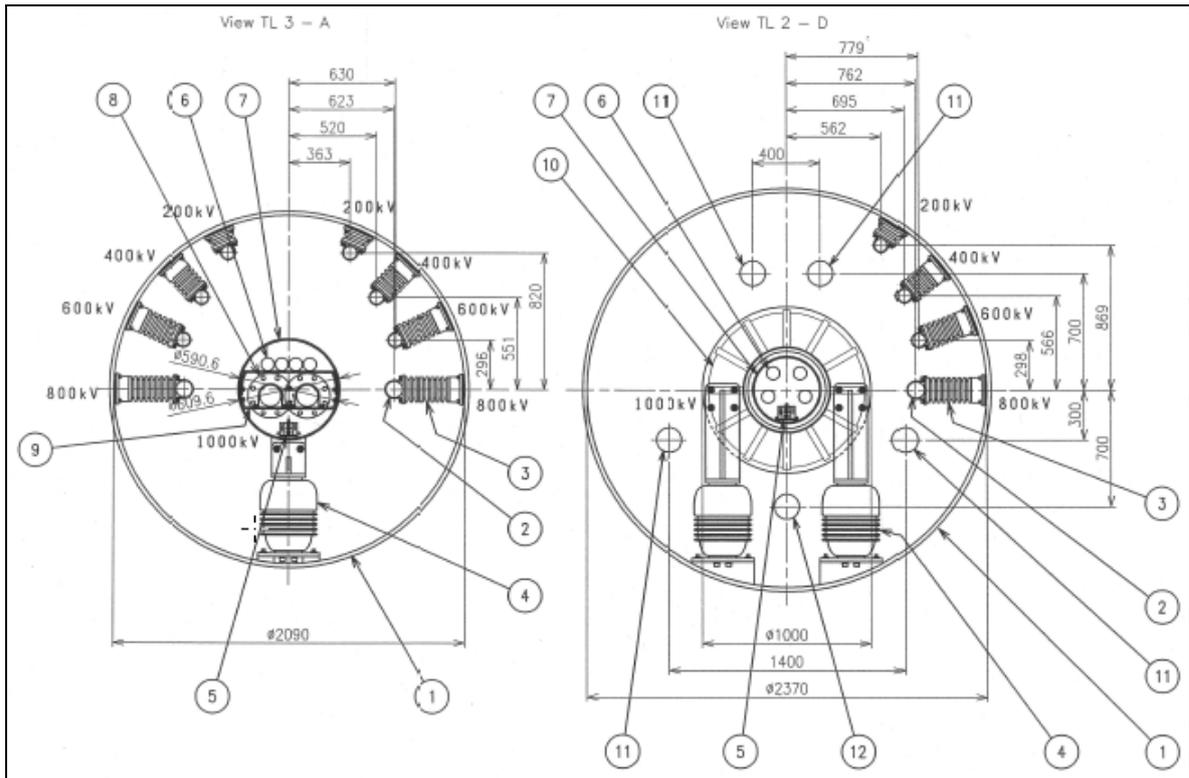


図 2.4-4 トランスミッションライン内の配置案 (TL2-D、TL3-A)

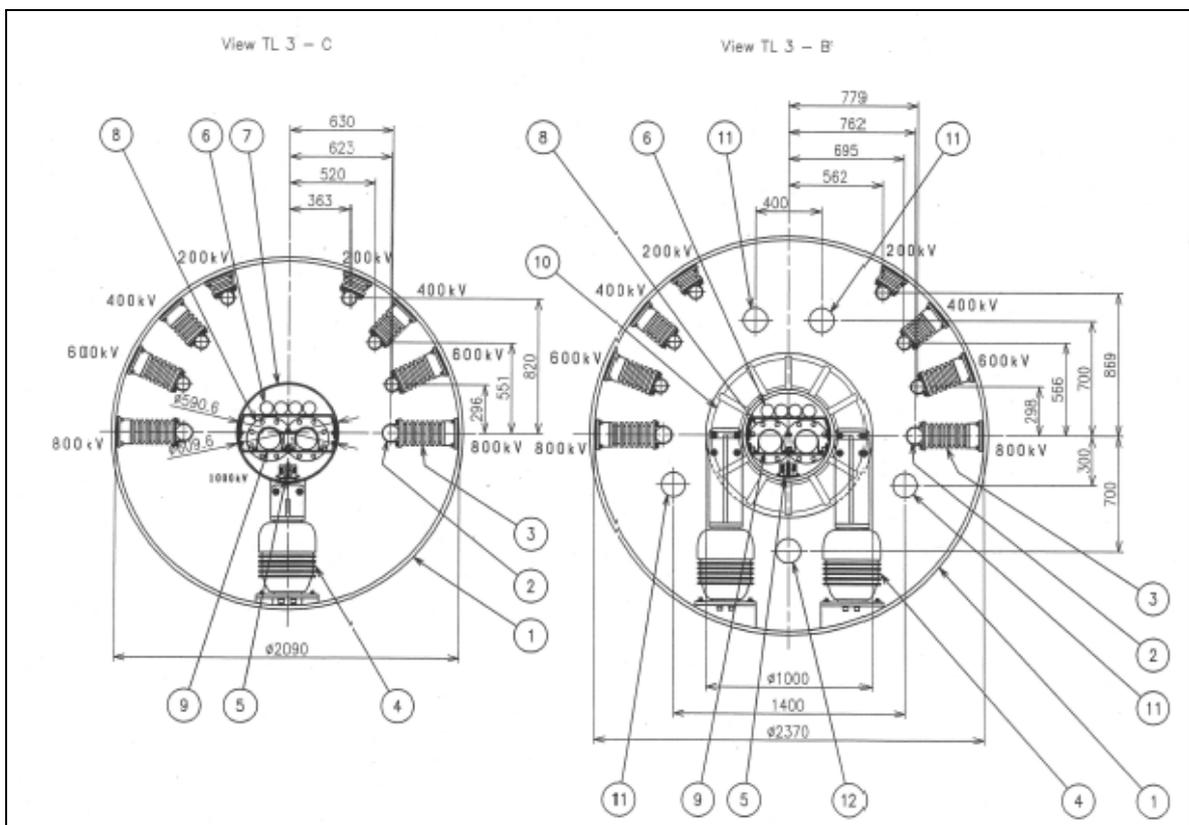


図 2.4-5 トランスミッションライン内の配置案 (TL3-B、TL3-C)

2.5 等価回路モデル

本報告書で使用する等価回路を 図 2.5-1 に示す。

等価回路における電圧、電流の計測ポイントを 図 2.5-2 に示す。

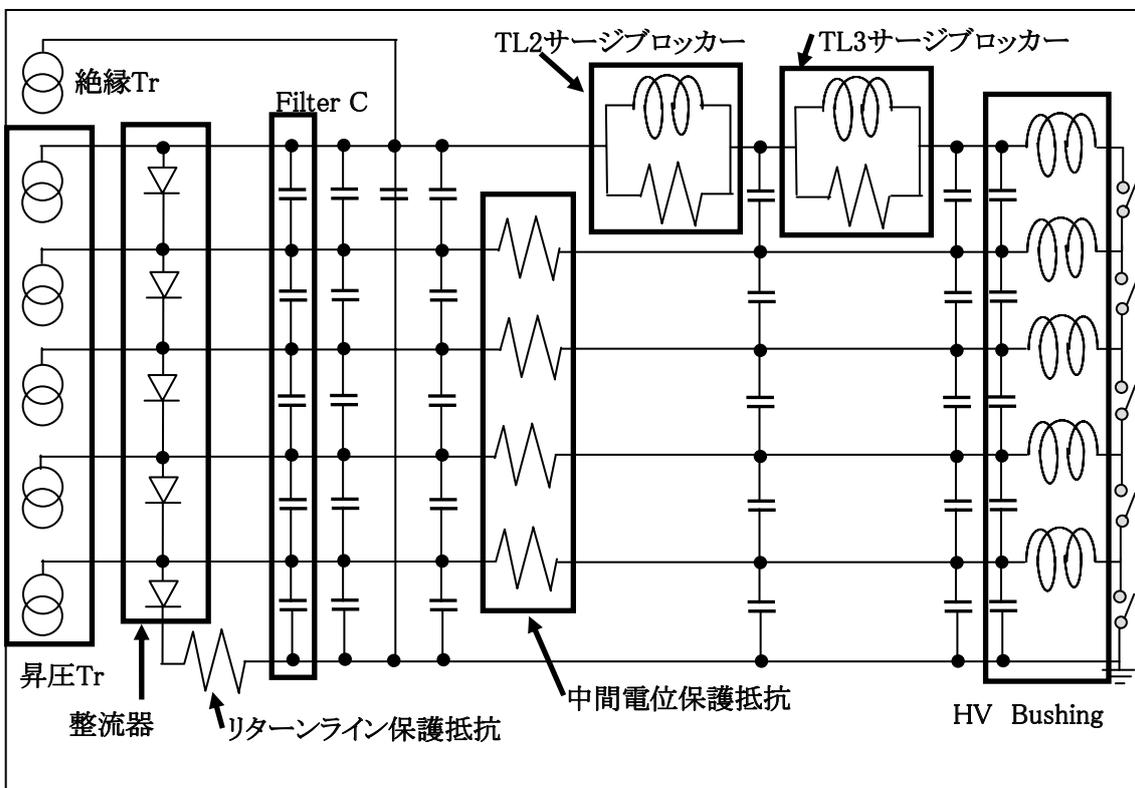


図 2.5-1 等価回路モデル

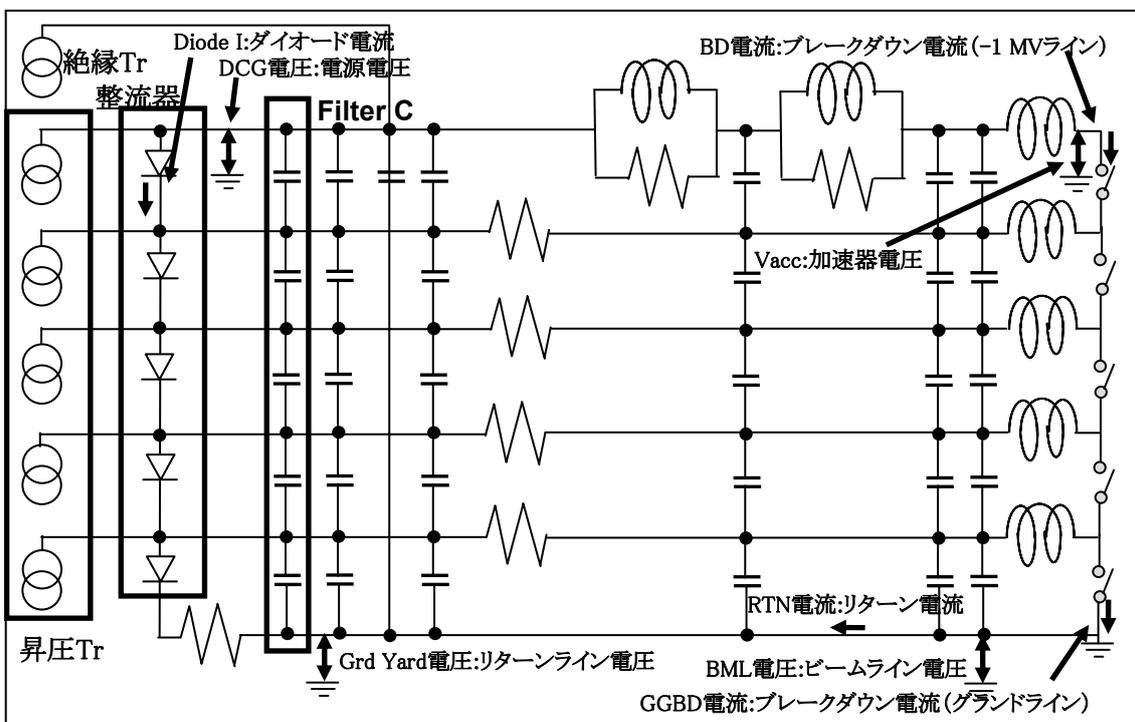


図 2.5-2 等価回路モデル計測ポイント

### 3. サージ抑制のための回路検討

#### 3.1 初期等価回路構成での検討

トランスミッションラインの回路定数(静電容量)は図 3.1-1 に示す図のごとく、配置的に隣同士となる導体間での静電容量を計算するように設定している。導体間を越えての静電容量は省略した。すなわち、0.8 MV-0.4 MV 間、0.8 MV-0.2 MV 間、0.6 MV-0.2 MV 間の静電容量は省略した。

また、初期のトランスミッションラインは HVD1 接続点を境に昇圧トランス側を TL1、加速器側を TL2 と呼ぶ。TL1 の長さは約 50.6 m、TL2 の長さは約 75.1 m として検討した。初期は TL3 の設定を行っておらず、TL2 に TL3 を含めた形で検討していた。

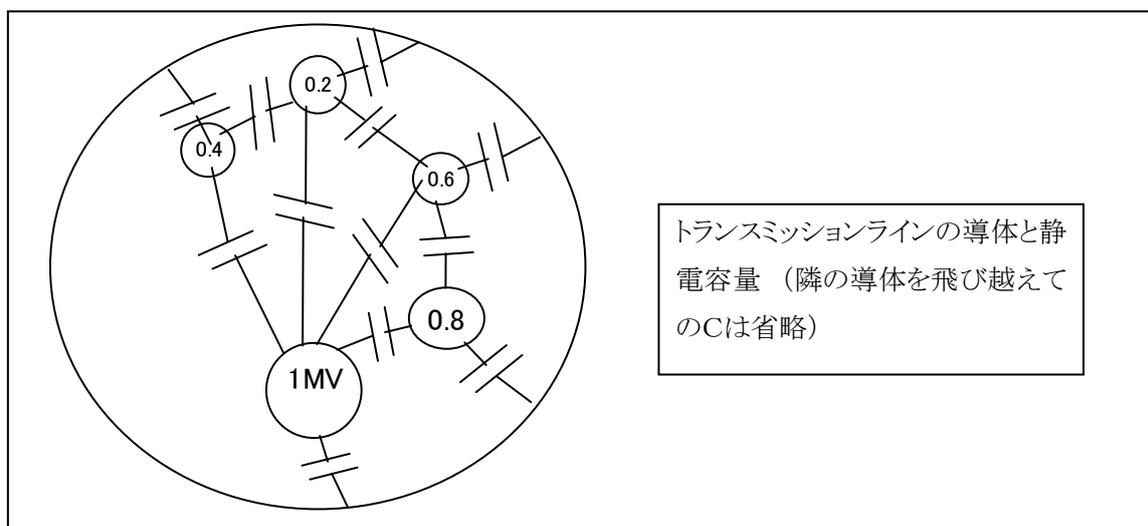


図 3.1-1 静電容量の設定

#### 3.1.1 初期等価回路構成での回路定数

初期等価回路構成での回路定数(静電容量、インダクタンス)を表 3.1.1-1~6 に示す。

表 3.1.1-1 TL1 における内部導体と外管間の静電容量 (約 50.6 m)

	$\Phi$ (mm)	C(pF/m)	C( $\mu$ F)
-1 MV	250	30.971	0.001567
-800 kV	120	21.971	0.001112
-600 kV	80	18.932	0.000958
-400 kV	80	18.932	0.000958
-200 kV	80	18.932	0.000958

表 3.1.1-2 TL1 における二導体間の静電容量 (約 50.6 m)

		gap(mm)	C(pF/m)	C( $\mu$ F)
-1 MV	-800 kV	270	26.001	0.001316
-1 MV	-600 kV	355.14	19.087	0.000966
-1 MV	-400 kV	460.65	16.200	0.000820
-1 MV	-200 kV	575.59	14.342	0.000726
-800 kV	-600 kV	205.97	19.680	0.000996
-600 kV	-400 kV	220.06	16.341	0.000827
-400 kV	-200 kV	206.16	16.991	0.000860

表 3.1.1-3 TL1 における内部導体のインダクタンス (約 50.6 m)

		$\Phi$ (mm)	L( $\mu$ H/m)	L( $\mu$ H)
-1 MV		250	0.3583	18.1319
-800 kV		120	0.5051	25.5594
-600 kV		80	0.5862	29.6626
-400 kV		80	0.5862	29.6626
-200 kV		80	0.5862	29.6626

表 3.1.1-4 TL2 における内部導体と外管間の静電容量 (約 75.1 m)

		$\Phi$ (mm)	C(pF/m)	C( $\mu$ F)
-1 MV		600	60.562	0.004548
-800 kV		100	20.492 $\times$ 2	0.003078
-600 kV		100	20.492 $\times$ 2	0.003078
-400 kV		100	20.492 $\times$ 2	0.003078
-200 kV		100	20.492 $\times$ 2	0.003078

表 3.1.1-5 TL2 における二導体間の静電容量 (約 75.1 m)

		gap(mm)	C(pF/m)	C( $\mu$ F)
-1 MV	-800 kV	422	30.071 $\times$ 2	0.004517
-1 MV	-600 kV	493.83	26.856 $\times$ 2	0.004034
-1 MV	-400 kV	555.65	24.115 $\times$ 2	0.003622
-1 MV	-200 kV	694.83	20.206 $\times$ 2	0.003035
-800 kV	-600 kV	286.53	15.959 $\times$ 2	0.002397
-600 kV	-400 kV	250.20	17.303 $\times$ 2	0.002599
-400 kV	-200 kV	252.53	17.203 $\times$ 2	0.002584

表 3.1.1-6 TL2 における内部導体のインダクタンス (約 75.1 m)

	Φ(mm)	L(μH/m)	L(μH)
-1 MV	600	0.2071	15.5535
-800 kV	100	0.5654 ÷ 2	21.2323
-600 kV	100	0.5654 ÷ 2	21.2323
-400 kV	100	0.5654 ÷ 2	21.2323
-200 kV	100	0.5654 ÷ 2	21.2323

3.1.2 初期等価回路

NBI 電源の初期等価回路を図 3.1.2-1 に示す。

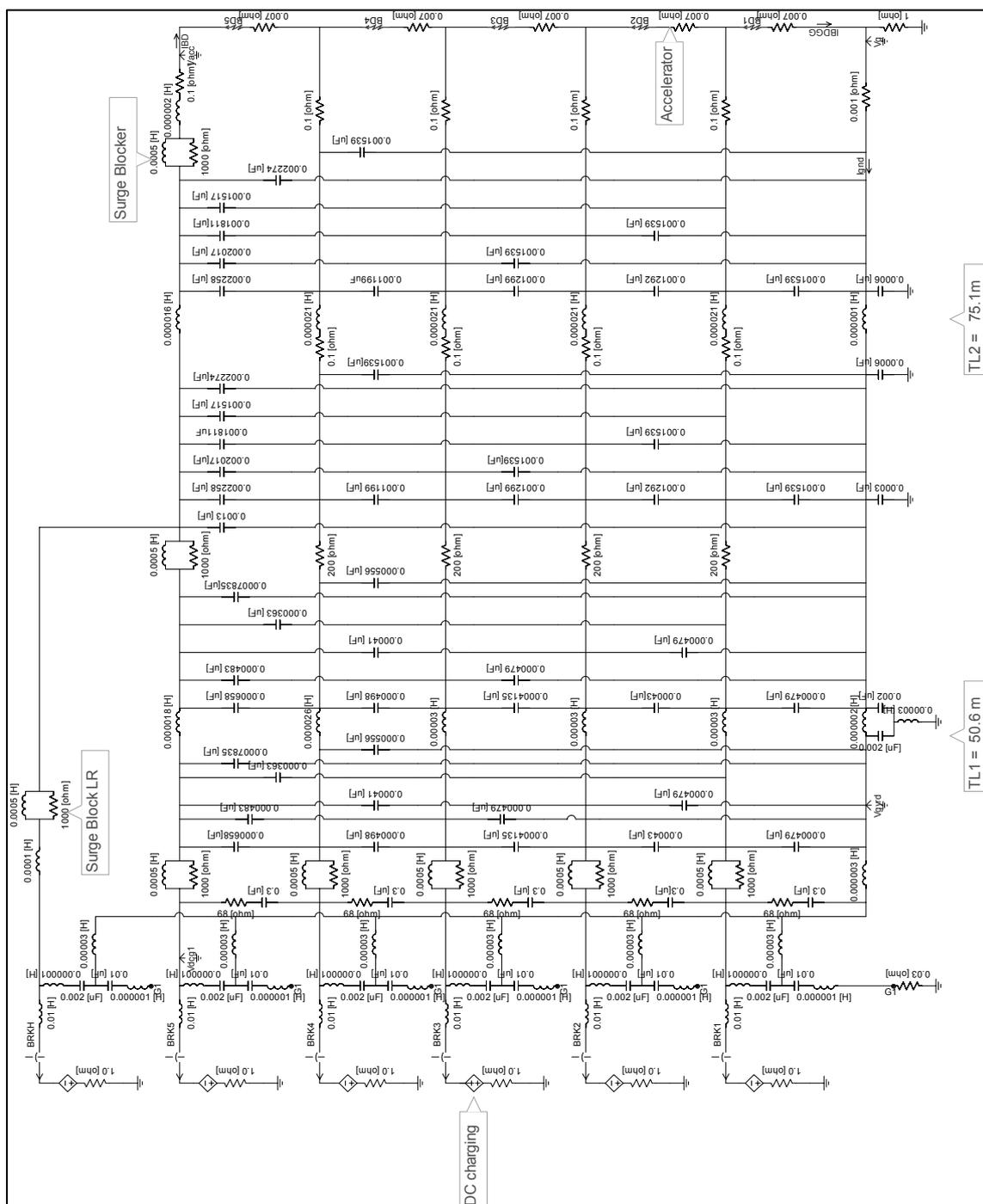


図 3.1.2-1 初期等価回路

- (1) トランスミッションラインはHVD1を境にTL1とTL2に分けていた。TL1の長さを約50.6 m、TL2の長さを約75.1 mとしていた。
- (2) トランスミッションライン昇圧トランス側の各電位導体と絶縁トランス二次出力側にサージ抑制用LRを挿入することを想定していた。
- (3) 直流発生器等価回路に整流ダイオードモデルを付加していない。
- (4) トランスミッションラインのTL1とTL2の境近くに、-1 MV 導体にはサージブロッカーを、他の中間電位導体には保護抵抗を設けていた。

### 3.1.3 初期等価回路のシミュレーション結果

初期等価回路のシミュレーション結果を 図 3.1.3-1 に示す。

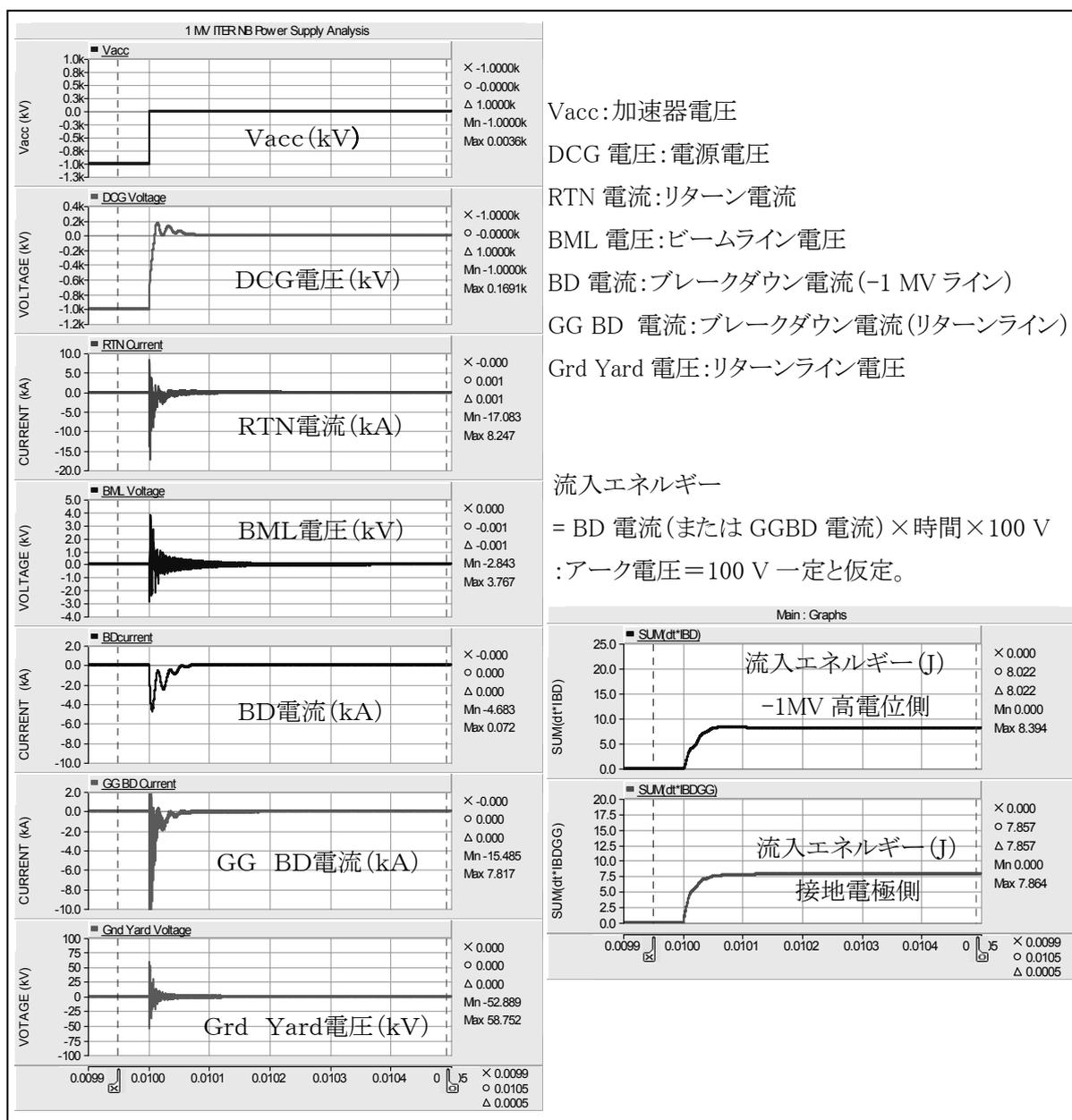


図 3.1.3-1 初期等価回路の等価回路でのシミュレーション結果

本シミュレーション結果では、イオン源加速器への流入エネルギーが -1 MV 高電位側、および接地電極側とも ITER の条件である 50 J 以下(8 J 程度)になっている。

しかしながら、本等価回路には整流ダイオードモデルが付加されていないこと、また、サージ抑制用LRおよびサージブロッカーを各部に設置していた状態でのシミュレーション結果であることから、実際の機器配置を考慮した場合に相違があるものと考えられる。そこで、ITER の建屋レイアウトなど明らかになってきた条件を考慮して、電源機器配置と回路解析の再検討を行った。すなわち、ITER 建屋の詳細検討に伴いトランスミッションラインの形状や高電圧機器の配置が変更となり、前解析が妥当であるかどうかを確認する必要が生じた。さらに、これまでの等価回路モデルにおいて現状にそぐわない箇所を修正を加えたモデルを構築し検討を行った。

### 3. 2 ダイオードモデル、中間電位保護抵抗、リターンライン保護抵抗を追加した場合の検討

3.1 初期等価回路構成の検討の回路定数に対し、下記を検討した。

- (1) ダイオードモデルの追加:初期の等価回路にはダイオードモデルが含まれていなかったため追加した。
- (2) TL1(加速器側)のサージブロッカーの削除:本サージブロッカーはサージ解析の結果、効果が少ないため削除した。なお、本検討でサージブロッカーは飽和させない程度の十分なV. sを持たせたコアを想定し、インダクタンスと二次回路抵抗の並列回路で模擬した。
- (3) 中間電位(電源側)の各サージブロッカーを削除:本サージブロッカーはサージ解析の結果、効果が少なく、現実的な配置を考慮した場合設置も困難なため削除した。
- (4) 中間電位(TL3 部)の保護抵抗の追加:各中間電位に流れ込むブレイクダウン時の電流を抑えるため追加した。
- (5) リターンラインに保護抵抗を追加:ブレイクダウン時の放電電流の減衰を速めるため追加した。

#### 3. 2. 1 等価回路

ダイオードモデルの追加、中間電位保護抵抗の追加、リターンライン保護抵抗の追加、中間電位サージブロッカーの削除、および TL1 サージブロッカーの削除をおこなった等価回路を図 3.2.1-1 に示す。

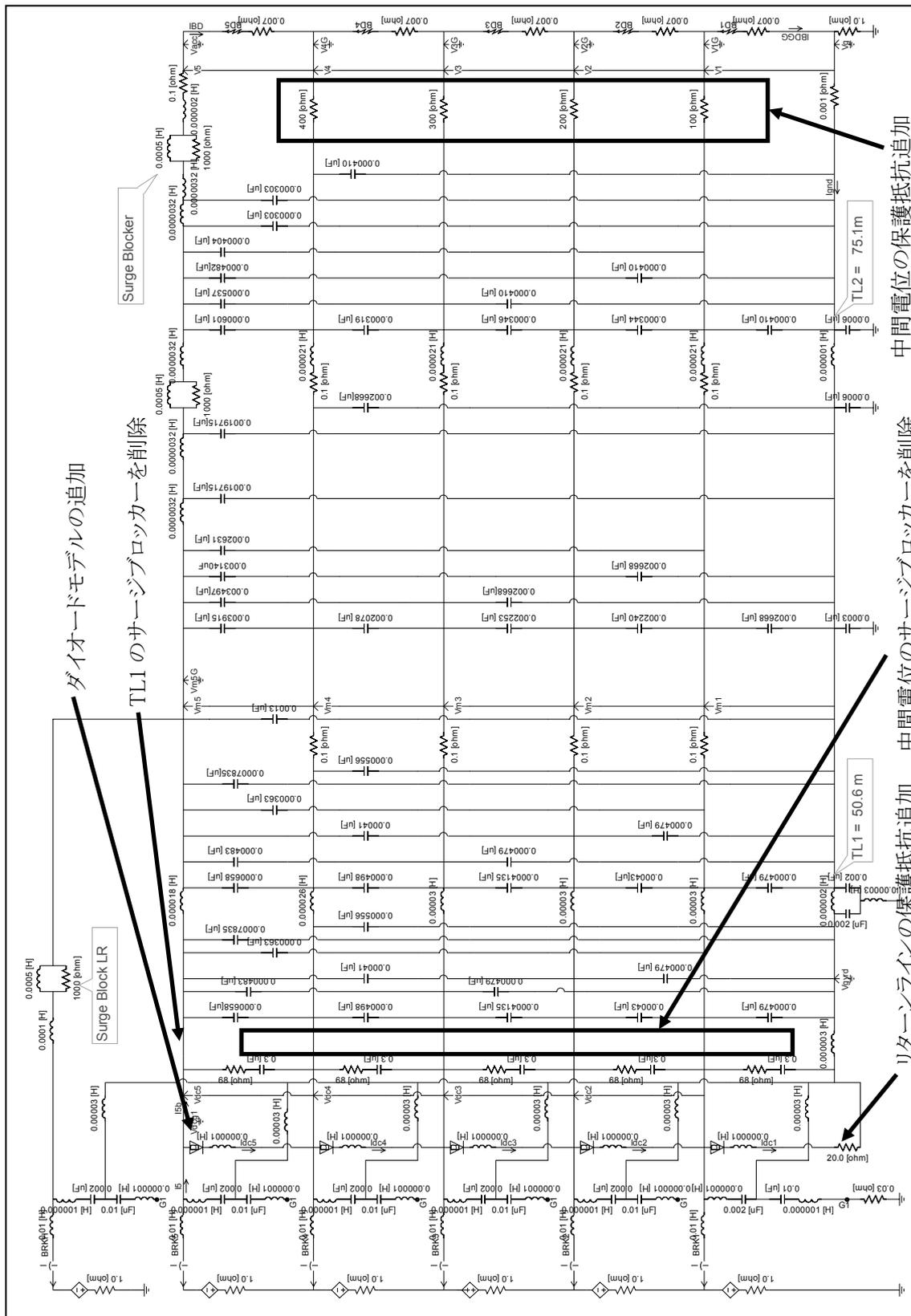


図 3.2.1-1 等価回路

3. 2. 2 シミュレーションの結果

初期等価回路に比べ、高電位側(-1 MV 導体)またはリターンラインに保護抵抗を設けることを検討した。その結果を 図 3.2.2-1~2 に示す。

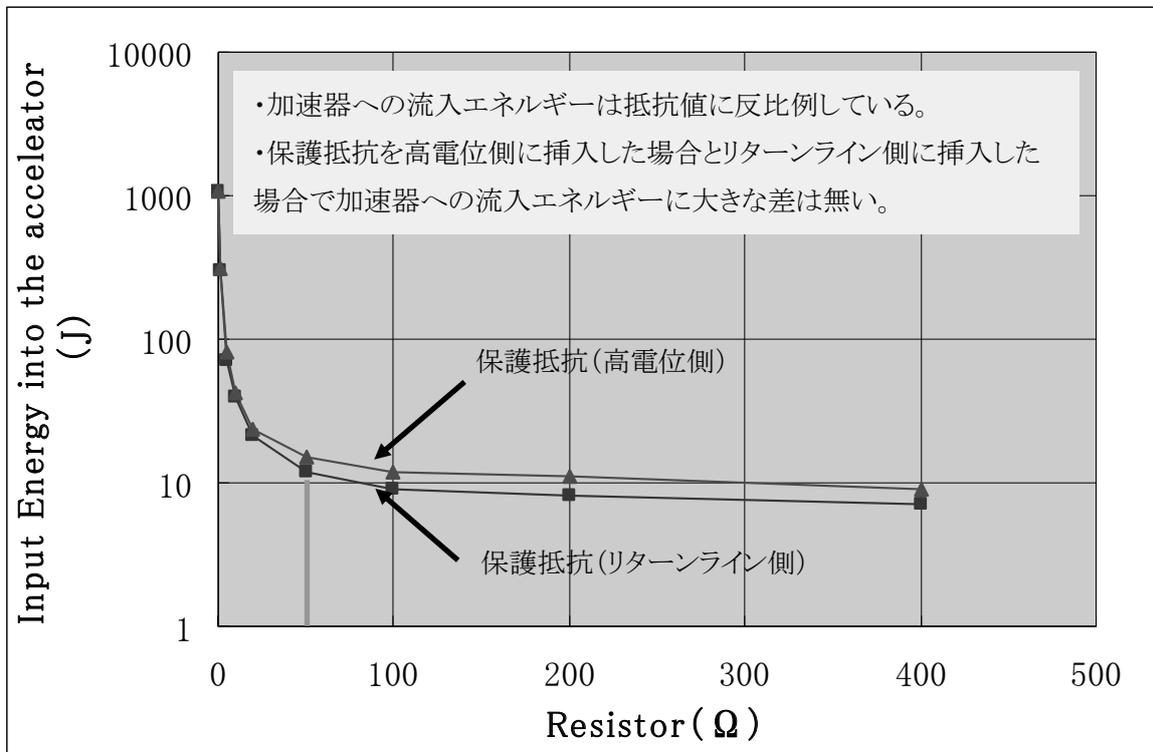


図 3.2.2-1 保護抵抗値と加速器への流入エネルギー抑制の効果

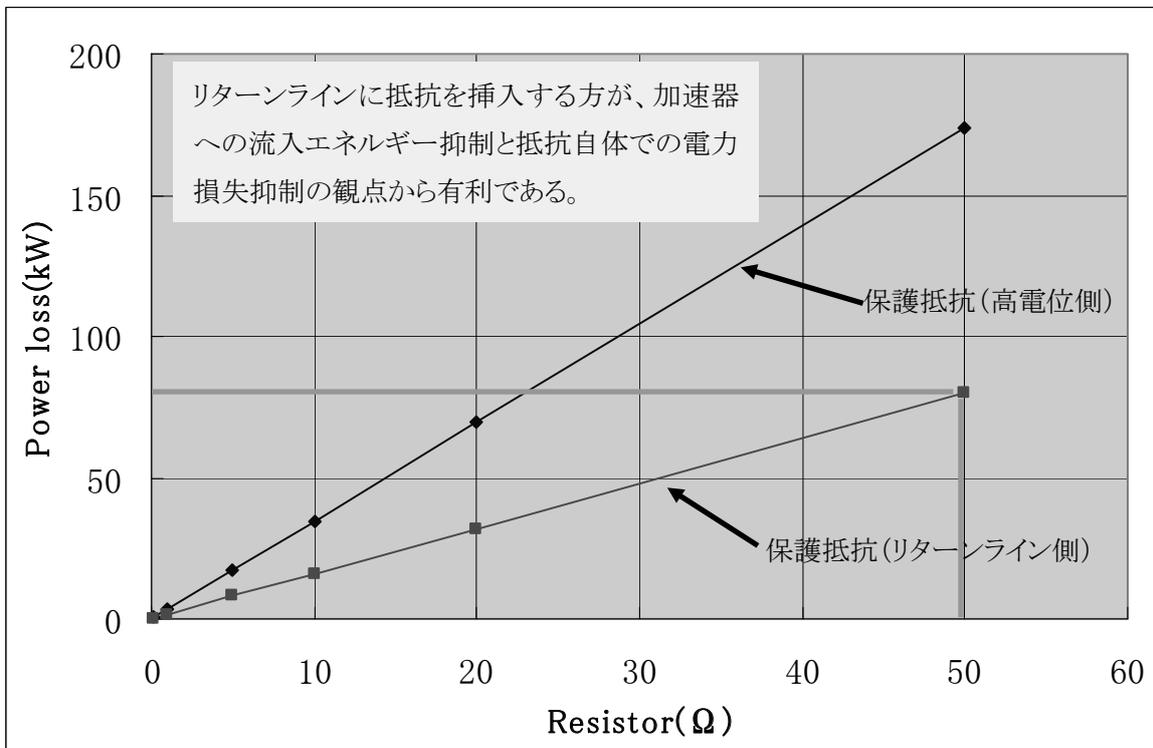


図 3.2.2-2 ビーム出力時に保護抵抗自体で消費する電力

本検討より、次のことが分かった。

- (1) 高電位側(-1 MV 導体)とリターンライン側では定常時流れる電流がリターンライン側のほうが小さいので、消費する電力量も小さくなっている。
- (2) 流入エネルギーは保護抵抗が 50 Ωより小さくなると、急激に大きくなっている。
- (3) 流入エネルギーの大きさに関して、-1 MV 導体に抵抗を挿入した場合と、接地電位側であるリターンラインに挿入した場合で、有意な差は無い。

以上より、流入エネルギー抑制用保護抵抗の値は 50 Ω程度が良く、絶縁など抵抗の設置がより容易な接地電位側に設けることが有効なことが明らかになった。

### 3.3 絶縁トランス 2 次側ケーブルインダクタンスおよび絶縁トランス静電容量の検討

3.2 項(ダイオードモデル、中間電位保護抵抗、リターンライン保護抵抗を追加した場合の検討)で示した回路定数に対し、下記を検討した。

- (1) 高電位デッキ 1(HVD1)のサージブロッカーの削除:本サージブロッカーはイオン源加速器に流入するサージの抑制に殆ど効果が無いことが判明したため削除した。
- (2) 絶縁トランス 2 次側ケーブルインダクタンスの変更:初期等価回路では 100 μHとされていたが、絶縁トランスのブッシングの長さとは HVD1 への接続ケーブルの長さより、より実態に近い 20 μHに変更した。
- (3) 絶縁トランスの 1 次巻線と 2 次巻線間の静電容量の変更:変圧器の構造より、初期等価化回路の 2000 pF から、より現実的と考えられる 7000 pFに変更した。この値は変圧器メーカーによる概略検討の数値である。

#### 3.3.1 等価回路

絶縁トランス二次出力側のサージ抑制 LR の削除、絶縁トランス 2 次側ケーブルインダクタンスを 20 μH、および絶縁トランス 1 次巻線と 2 次巻線間の静電容量を 7000 pF にした等価回路を図 3.3.1-1 に示す。

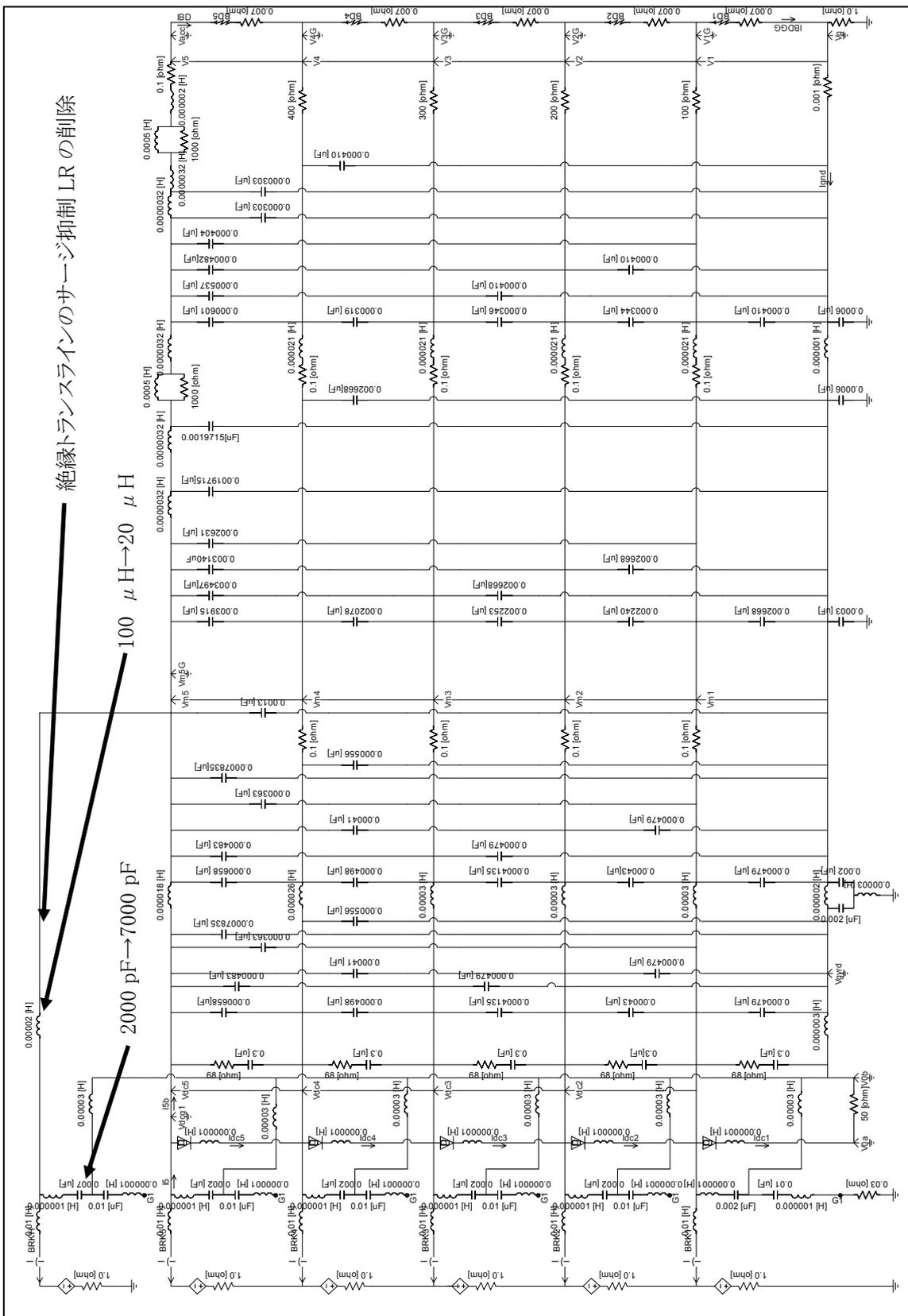


図 3.3.1-1 等価回路

### 3.3.2 シミュレーション結果

絶縁トランスの静電容量と絶縁トランス 2 次側ケーブルインダクタンスを変更した場合の等価回路を用いて解析した結果の電流、電圧、流入エネルギーの比較を 表 3.3.2-1 に示す。

これらの結果から、HVD1 出力ケーブルに設けたサージブロッカーの有無によって、サージ電流や電圧はほとんど変化しないことが分かった。

絶縁トランス 2 次側ケーブルインダクタンスおよび絶縁トランスの静電容量の見直しにより、ブレークダウン電流(-1 MV ライン)が約 3.9 kA から約 4.4 kA と幾分大きくなっているが、許容値内と考える。

表 3.3.2-1 絶縁トランス 2 次側ケーブルインダクタンスおよび絶縁トランス静電容量に関するサージ電圧、電流、流入エネルギーの比較

LTr	CTr		Idiode	IRTN	VBML-	VBML+	IBD	IBDGG	VGY-	VGY+	ITr	Energy
$\mu$ H	pF		A	A	V	V	A	A	V	V	A	J
100	2000	○	2127	-8144	-3219	3111	-3867	-8116	-18232	19899	-461	16.5
100	2000	×	2396	-8304	-3315	3260	-3865	-8129	-18383	19824	-474	16.5
20	7000	○	3132	-8151	-3238	3017	-4413	-8119	-18196	19832	-1418	18.1
20	7000	×	3051	-8750	-3510	3382	-4316	-8190	-18177	22604	-1272	18.0

Idiode=ダイオード電流, IRTN=リターン電流, VBML=ビームライン電圧,  
 IBD=ブレークダウン電流(-1 MVライン), IBDGG=ブレークダウン電流(リターンライン),  
 VGY=リターンライン電圧, ITr=絶縁トランス サージ電流, Energy=流入エネルギー(接地電極側)

○: Surge suppression LR =installed      × : Surge suppression LR =remove

### 3.4 中間電位保護抵抗設置位置の検討

3.3 項(絶縁トランス 2 次側ケーブルインダクタンスおよび絶縁トランス静電容量の検討)で示した回路定数に対し、下記を検討した。

- (1) 中間電位(加速器側)の保護抵抗を TL2 側へ移動:保護抵抗をイオン源加速器側に設けるにはトカマク建屋内に設置する必要がある。しかしながら、トカマク建屋内のスペースの制限から保護抵抗を TL2 に移動した場合を検討した。

#### 3.4.1 等価回路

中間電位保護抵抗をイオン加速器側から TL2 側へ移動した等価回路を図 3.4.1-1 に示す。

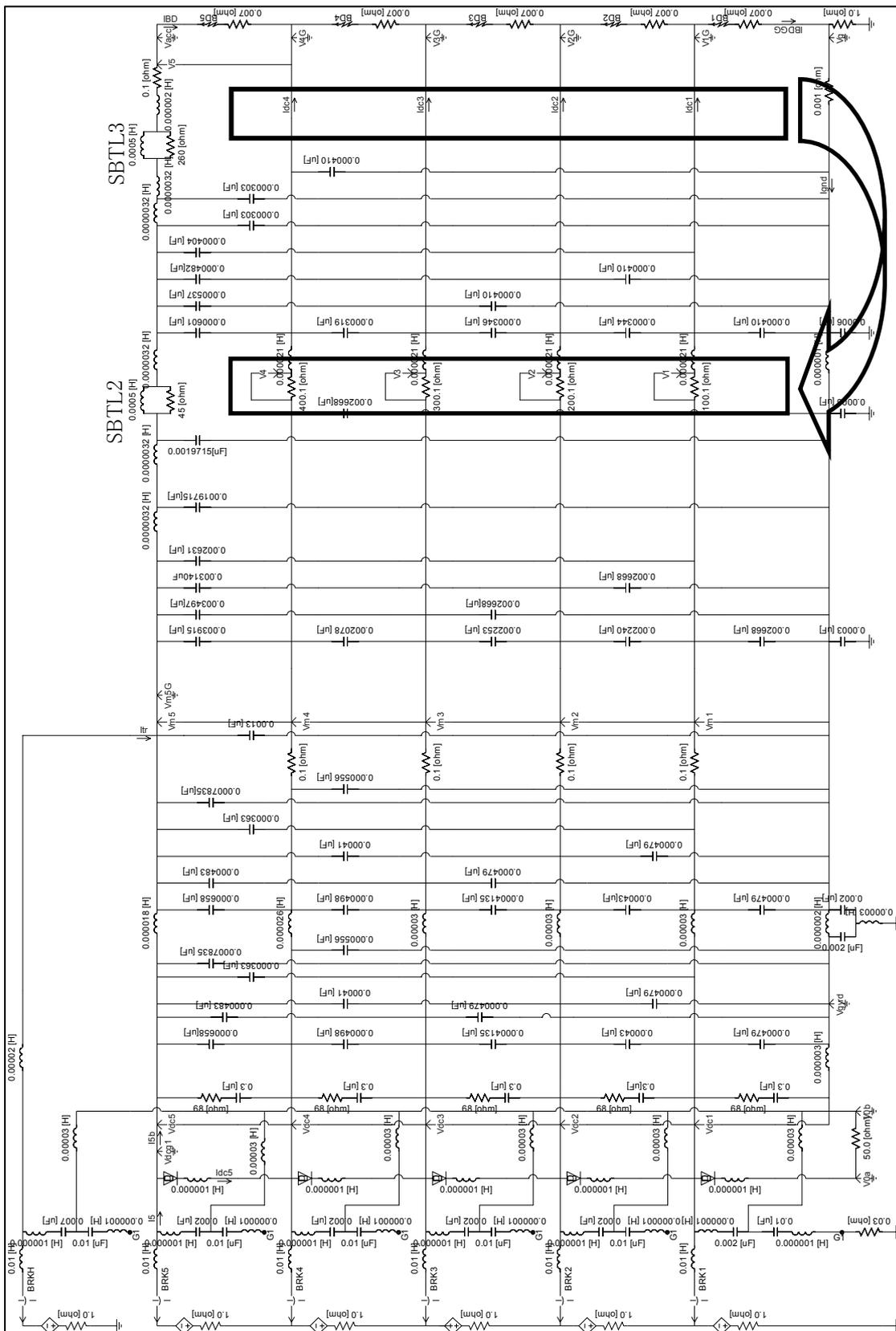


図 3.4.1-1 3.4 項の等価回路

3. 4. 2 中間保護抵抗をイオン加速器側から TL2 側へ移動したシミュレーション結果

TL2 に設置するサージブロッカー (SBTL2) と TL3 に設置するサージブロッカー (SBTL3) の抵抗およびインダクタンスを変更した場合の電流、電圧、流入エネルギーの比較を表 3.4.2-1 に示す。

表 3.4.2-1 SBTL2 と SBTL3 の抵抗およびインダクタンスを変化させた場合の電流、電圧、流入エネルギーの比較

SBTL2		SBTL3		RTN	BD	BDGG	VGY-	VGY+	Energy	Energy
R	L	R	L	電流	電流	電流	電圧	電圧	HV-line	GRG
Ω	μH	Ω	μH	kA	kA	kA	kV	kV	J	J
45	500	260	500	10.764	-4.653	-10.105	-18.015	33.015	20.6	15.3
175	750	130	250	10.509	-4.145	-9.801	-15.896	27.794	21.3	15.6
240	875	65	125	10.512	-5.484	-10.186	-15.964	27.211	21.6	15.9
253	900	52	100	10.547	-5.953	-10.339	-16.042	27.199	21.6	15.9
279	950	26	50	10.712	-7.287	-10.779	-16.542	27.299	21.7	15.9
305	1000	0	0	10.917	-9.640	-11.535	-16.420	27.405	22.4	16.4

SBTL2 と SBTL3 のインダクタンスと抵抗の割合を検討した。これらの結果からサージブロッカーを全て TL2 に移行した場合、ブレークダウン電流が大きくなるため適切でないことが分かる。つまり TL3 に設置するサージブロッカーの比率を多くした方が良い。しかし、実際には設置スペースから、設置可能なサージブロッカーの最大寸法が制限される。今後も機器レイアウトと合わせて注意すべき点である。

3. 5 外管と内管の芯がずれた導体および並行で径の異なる導体の静電容量計算方式検討

(1) 3.4 項(中間電位保護抵抗設置位置の検討)までの回路定数の計算では、中心軸がずれた同軸でも同心として、また、平行導体で直径の違ったものも同径の計算式を使用していた。より正確な模擬をするために外管と内管の芯のずれを考慮するようにし、並行で径の異なる導体を考慮するようにした [6]。

(2) 今回よりトランスミッションラインの区分を TL1、TL2、TL3 として分けるようにし(3.4 項までは TL2 と TL3 を分けずに計算していた)、トランスミッションラインの長さを現状の配置にて検討するようにした。

(3) 計算コードに自動積算処理プログラムを追加した。

外管と内管の芯がずれた導体の場合の静電容量計算は図 3.5-1 を使用した。

並行で径の異なる導体の場合の静電容量計算は図 3.5-2 を使用した。

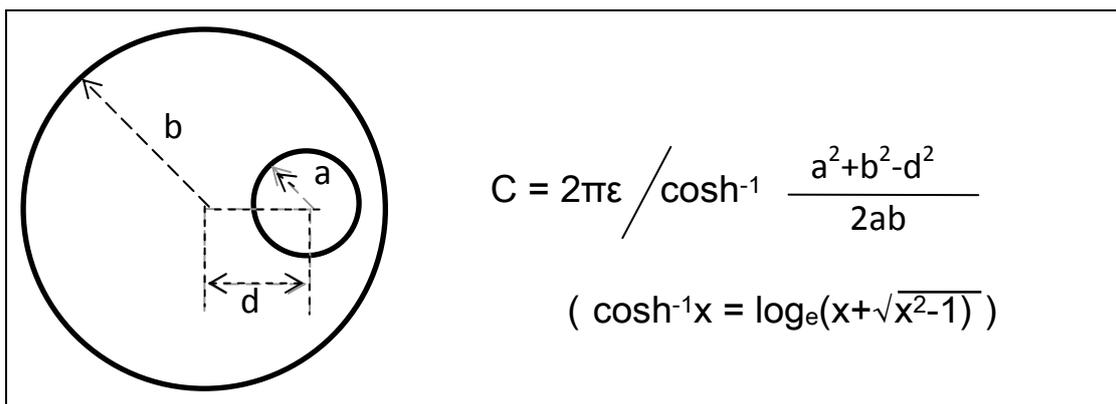


図 3.5-1 外管と内管の芯がずれた導体の場合の静電容量の計算式

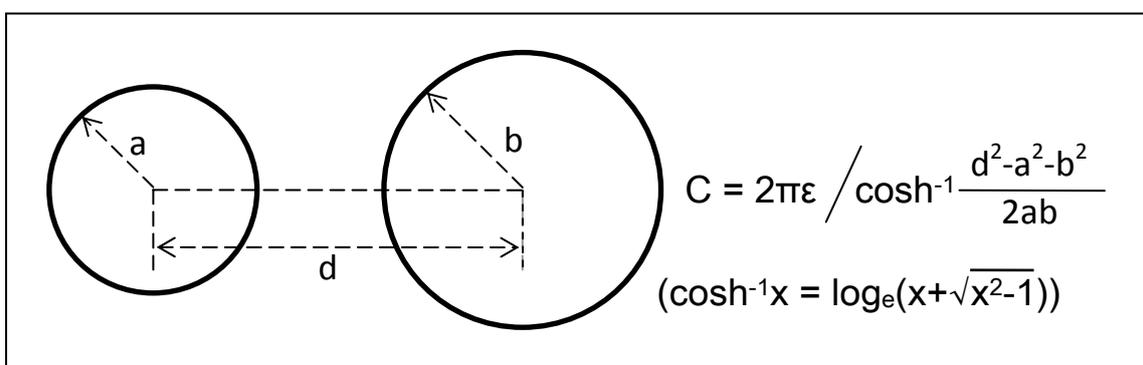


図 3.5-2 並行で径の異なる導体の場合の静電容量の計算式

上記、静電容量の計算式とトランスミッションラインの長さの再検討による、静電容量とインダクタンスの値の修正を 表 3.5-1～9 に示す。

表 3.5-1 TL1 における内部導体と外管間の静電容量 (36 m)

	Φ(mm)	d(mm)	C(pF/m)	C(μF)
-1 MV	267.5	0	32.267	0.001162
-800 kV	100	270	21.659	0.000780
-600 kV	80	355.14	20.787	0.000748
-400 kV	80	460.65	22.662	0.000816
-200 kV	80	575.59	27.378	0.000986

表 3.5-2 TL1 における二導体間の静電容量 (36 m)

	$\phi$ (mm)		$\phi$ (mm)	d(mm)	C(pF/m)	C( $\mu$ F)
-1 MV	267.5	-800 kV	100	270	27.215	0.000980
-1 MV	267.5	-600 kV	80	355.14	18.607	0.000670
-1 MV	267.5	-400 kV	80	460.65	15.525	0.000559
-1 MV	267.5	-200 kV	80	575.59	13.685	0.000493
-800 kV	100	-600 kV	80	205.97	18.857	0.000679
-600 kV	80	-400 kV	80	220.06	16.654	0.000600
-400 kV	80	-200 kV	80	206.16	17.387	0.000626

表 3.5-3 TL1 における内部導体のインダクタンス (36 m)

	$\Phi$ (mm)	L( $\mu$ H/m)	L( $\mu$ H)
-1 MV	250	0.3583	12.9002
-800 kV	100	0.5416	19.4972
-600 kV	80	0.5862	21.1038
-400 kV	80	0.5862	21.1038
-200 kV	80	0.5862	21.1038

表 3.5-4 TL2 における内部導体と外管間の静電容量 (67.5 m)

	$\Phi$ (mm)	d(mm)	C(pF/m)	C( $\mu$ F)
-1 MV	406.4	0	39.036	0.002635
-800 kV	100	422	21.912	0.001479
-600 kV	80	493.83	21.146	0.001427
-400 kV	80	555.65	22.422	0.001513
-200 kV	80	694.83	29.155	0.001968

表 3.5-5 TL2 における二導体間の静電容量 (67.5 m)

	$\phi$ (mm)		$\phi$ (mm)	d(mm)	C(pF/m)	C( $\mu$ F)
-1 MV	406.4	-800 kV	100	422	21.598	0.001458
-1 MV	406.4	-600 kV	80	493.83	17.351	0.001171
-1 MV	406.4	-400 kV	80	555.65	15.955	0.001077
-1 MV	406.4	-200 kV	80	694.83	13.940	0.000941
-800 kV	100	-600 kV	80	284.57	15.248	0.001029
-600 kV	80	-400 kV	80	250.20	15.395	0.001039
-400 kV	80	-200 kV	80	252.53	15.312	0.001034

表 3.5-6 TL2 における内部導体のインダクタンス (67.5 m)

	$\Phi$ (mm)	$L(\mu\text{H}/\text{m})$	$L(\mu\text{H})$
-1 MV	406.4	0.2850	19.2388
-800 kV	100	0.5654	38.1673
-600 kV	80	0.6101	41.1797
-400 kV	80	0.6101	41.1797
-200 kV	80	0.6101	41.1797

表 3.5-7 TL3 における内部導体と外管間の静電容量 (12.5 m)

	$\Phi$ (mm)	d(mm)	$C(\text{pF}/\text{m})$	$C(\mu\text{F})$
-1 MV	609.6	0	45.151	0.000564
-800 kV	100	623	$21.408 \times 2$	0.000535
-600 kV	100	696.07	$22.707 \times 2$	0.000568
-400 kV	100	757.63	$24.308 \times 2$	0.000608
-200 kV	100	896.08	$33.094 \times 2$	0.000827

表 3.5-8 TL3 における二導体間の静電容量 (12.5 m)

	$\phi$ (mm)		$\phi$ (mm)	d(mm)	$C(\text{pF}/\text{m})$	$C(\mu\text{F})$
-1 MV	609.6	-800 kV	100	623	$18.842 \times 2$	0.000471
-1 MV	609.6	-600 kV	100	696.07	$17.179 \times 2$	0.000429
-1 MV	609.6	-400 kV	100	757.63	$16.144 \times 2$	0.000404
-1 MV	609.6	-200 kV	100	896.75	$14.491 \times 2$	0.000362
-800 kV	100	-600 kV	100	296.08	$15.906 \times 2$	0.000398
-600 kV	100	-400 kV	100	277.71	$16.552 \times 2$	0.000414
-400 kV	100	-200 kV	100	311.46	$15.432 \times 2$	0.000386

表 3.5-9 TL3 における内部導体のインダクタンス (12.5 m)

	$\Phi$ (mm)	$L(\mu\text{H}/\text{m})$	$L(\mu\text{H})$
-1 MV	609.6	0.2464	3.0802
-800 kV	100	$0.6079 \div 2$	3.7995
-600 kV	100	$0.6079 \div 2$	3.7995
-400 kV	100	$0.6079 \div 2$	3.7995
-200 kV	100	$0.6079 \div 2$	3.7995

### 3.5.1 等価回路

上記を考慮して作成した等価回路を図 3.5.1-1 に示す。

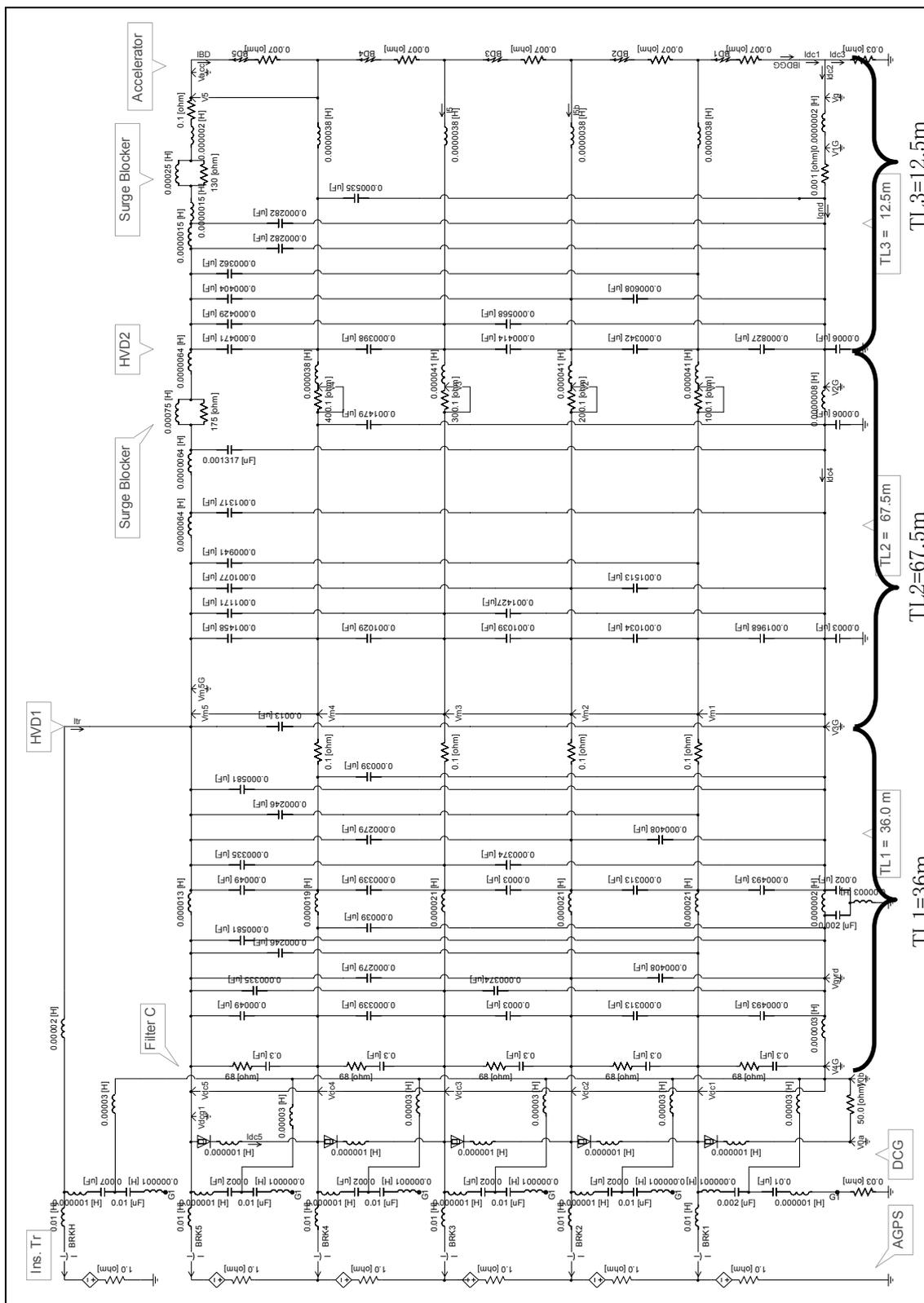


図 3.5.1-1 等価回路

3.5.2 シミュレーション結果

上記等価回路を用いたシミュレーション結果の波形を 図 3.5.2-1~2 に示す。

初期回路構成に比べ、電流、電圧の最大値は大きく変わっていない。流入エネルギーは約 8 J から 20 J と大きくなっている。しかし、ITER で規定されている 50 J の半分以下の値であり、許容範囲内と考える。

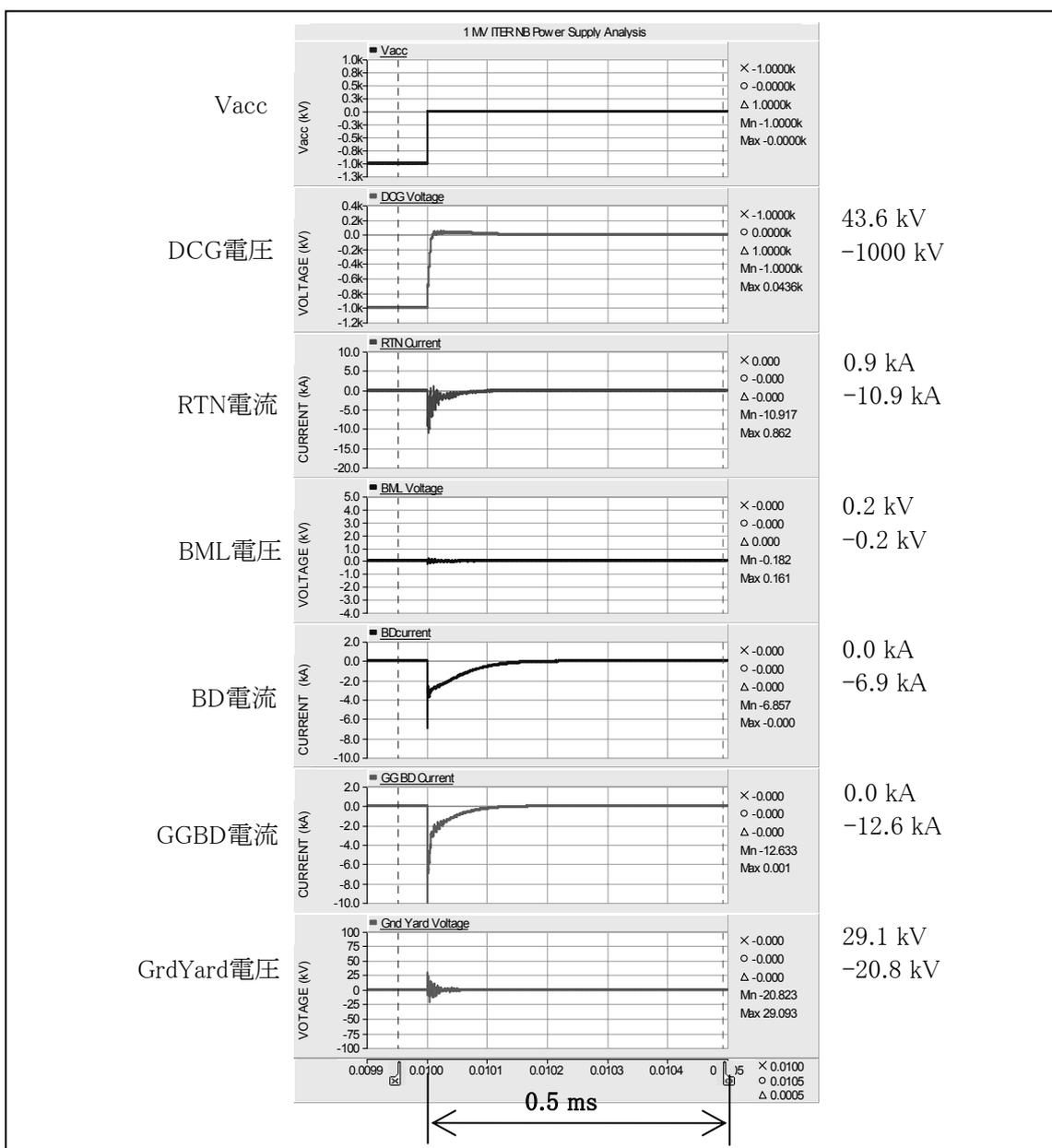


図 3.5.2-1 シミュレーション結果(その 1)

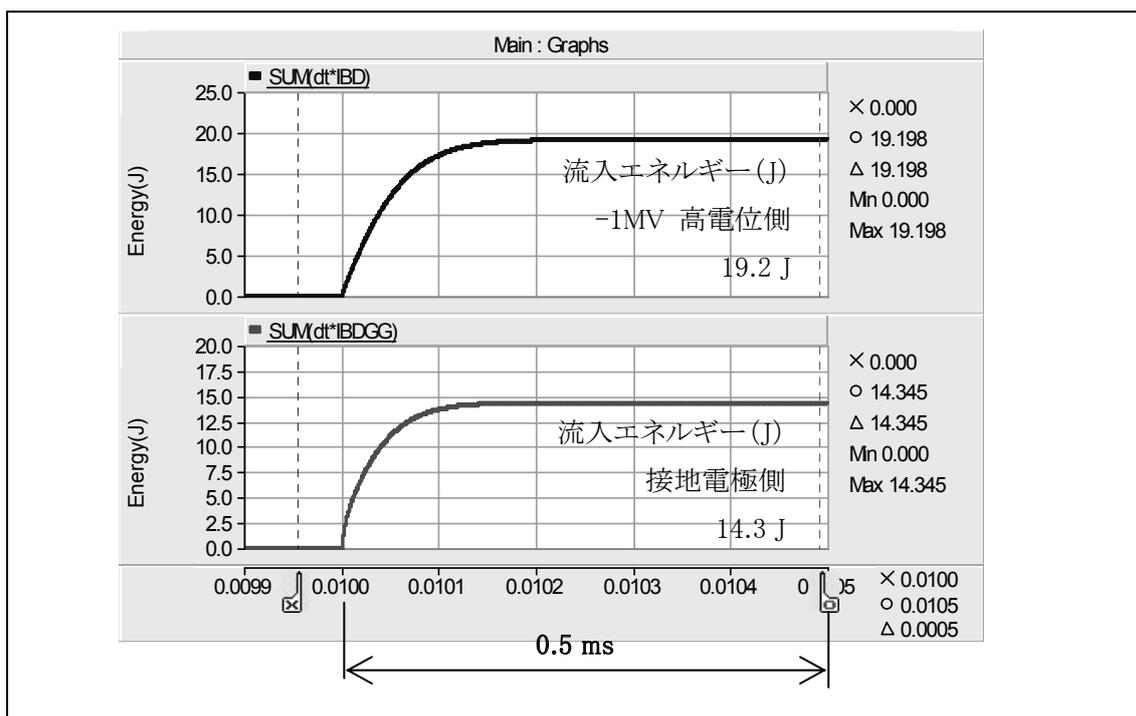


図 3.5.2-2 シミュレーション結果(その 2)

3.6 トランスミッションラインの長さ変更、高電圧ブッシングの定数、リターンライン抵抗等を考慮した検討

3.5 項(外管と内管の芯がずれた導体および並行で径の異なる導体の静電容量計算方式検討)において示した等価回路に関して、以下の点に注目し検討した。

- (1) 静電容量およびインダクタンスを最新のレイアウトに合わせ、かつ、細分化した。
- (2) 高電圧ブッシングの静電容量、インダクタンスを等価回路に追加した。
- (3) リターンラインの抵抗値、静電容量を最新レイアウトに基づいて再設定した。

3.6.1 レイアウトの見直し

2009年10月現在のレイアウトを図 3.6.1-1~3 に示す。図 3.6.1-1 はトカマク建屋内および建屋 37 との間の TL 配置を主に示している。図 3.6.1-2 は立面図を示す。

図 3.6.1-3 は全体配置を示している。

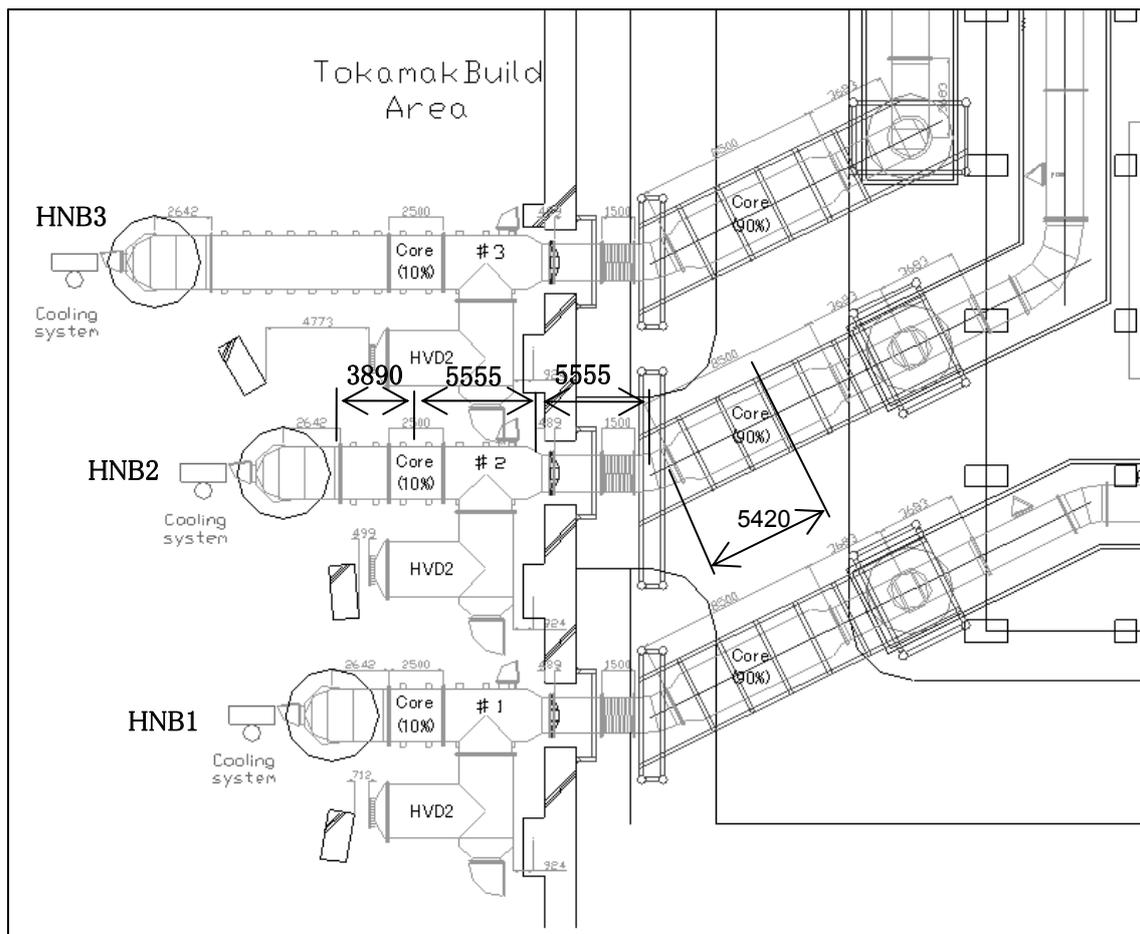


図 3.6.1-1 2009年10月現在のレイアウト(トカマク建屋内および建屋37との間の TL 配置)

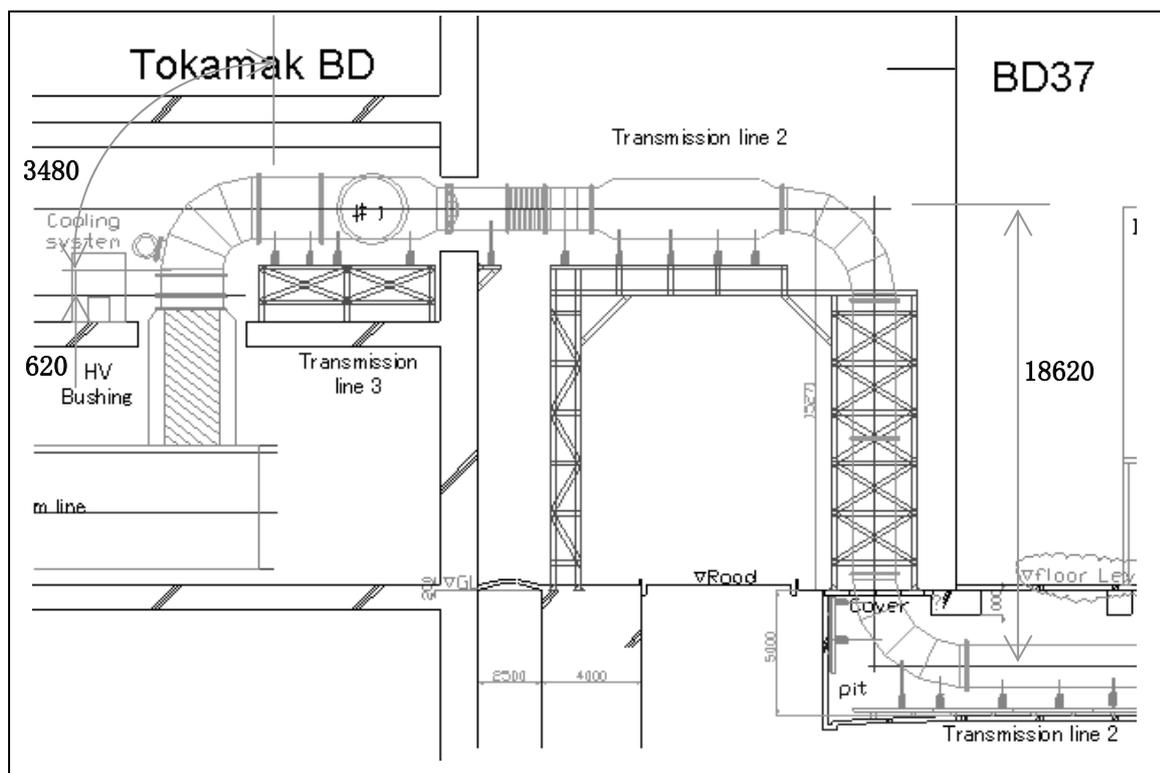


図 3.6.1-2 2009年10月現在のレイアウト(立面図)

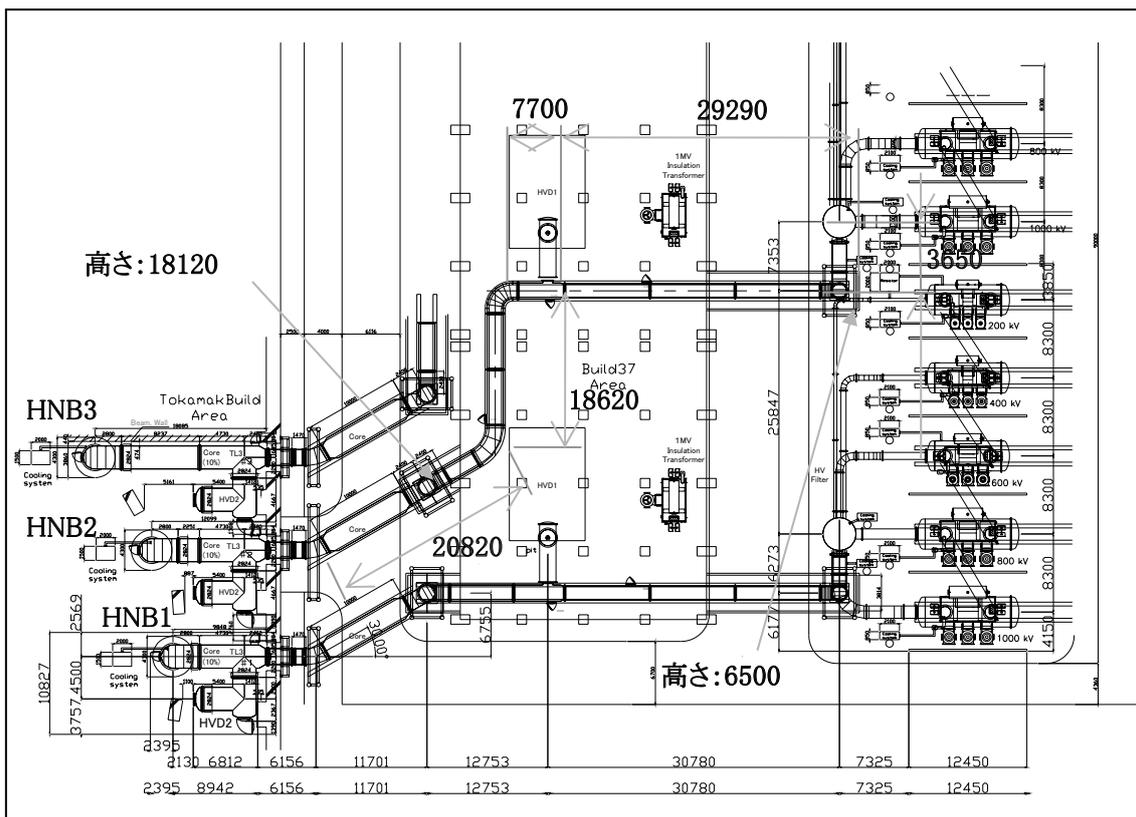


図 3.6.1-3 2009年10月現在のレイアウト(全体配置)

これらの配置から TL1、TL2、TL3 の長さは以下のようになる。

$$TL1 : 29290 + 6500 + 3650 \approx 39.4 \text{ m}$$

$$TL2 : 7700 + 18620 + 18120 + 20820 + 5555 \approx 70.8 \text{ m}$$

$$TL3 : 620 + 3480 + 3890 + 5555 \approx 13.5 \text{ m}$$

### 3.6.2 高電圧ブッシングの静電容量、インダクタンスの等価回路への追加

高電圧ブッシングの断面図を 図 3.6.2-1 に示す。高電圧ブッシングとは、トランスミッションラインをイオン源加速器に接続するための装置であり、トランスミッションラインの SF<sub>6</sub> ガスがイオン源加速器側つまりビームライン真空側へ流れ込まないように中間層に圧縮空気を保持した構造となっている。

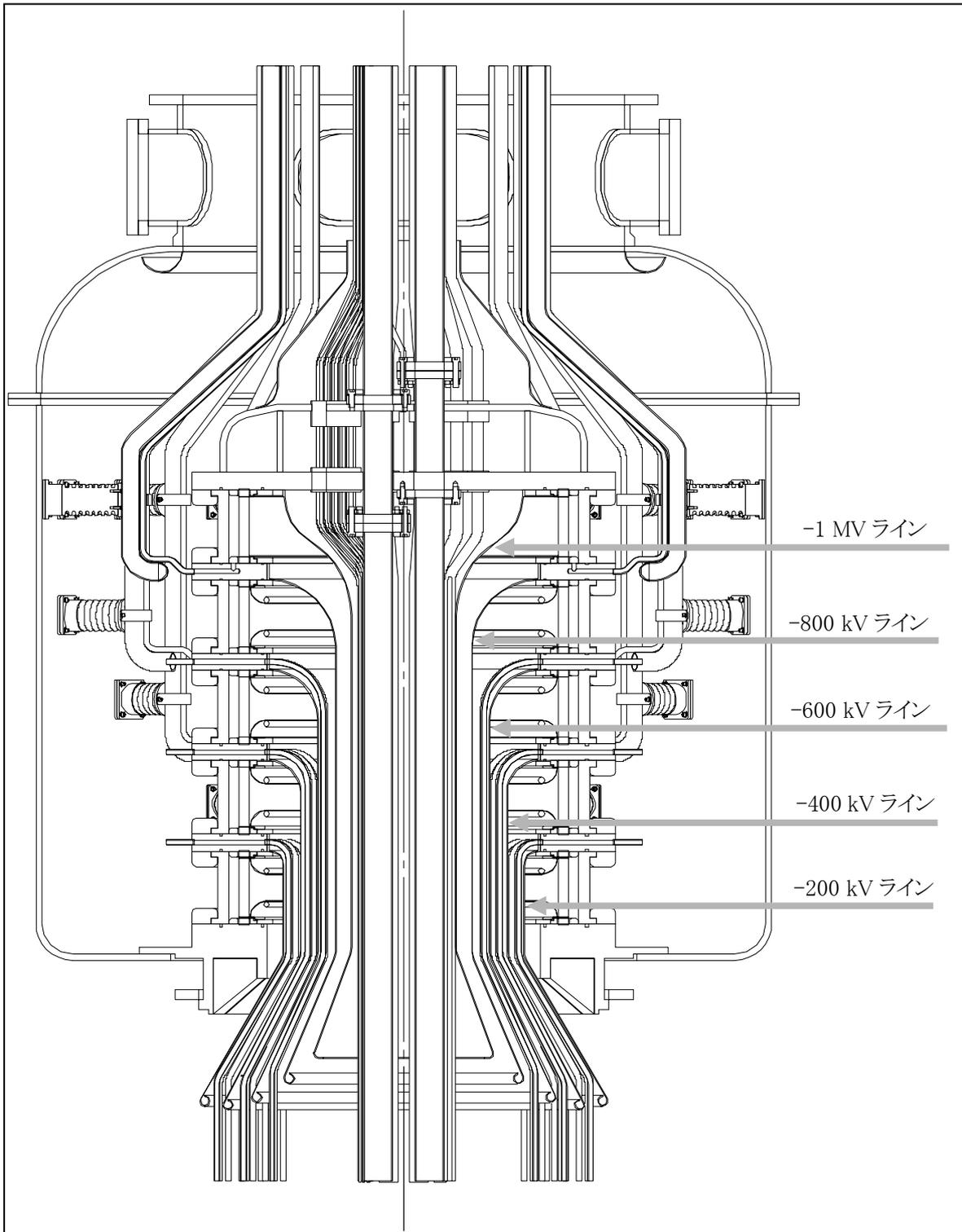


図 3.6.2-1 高電圧ブッシング断面図

高電圧ブッシングの静電容量を計算するための概略図(寸法)を 図 3.6.2-2 に示す。

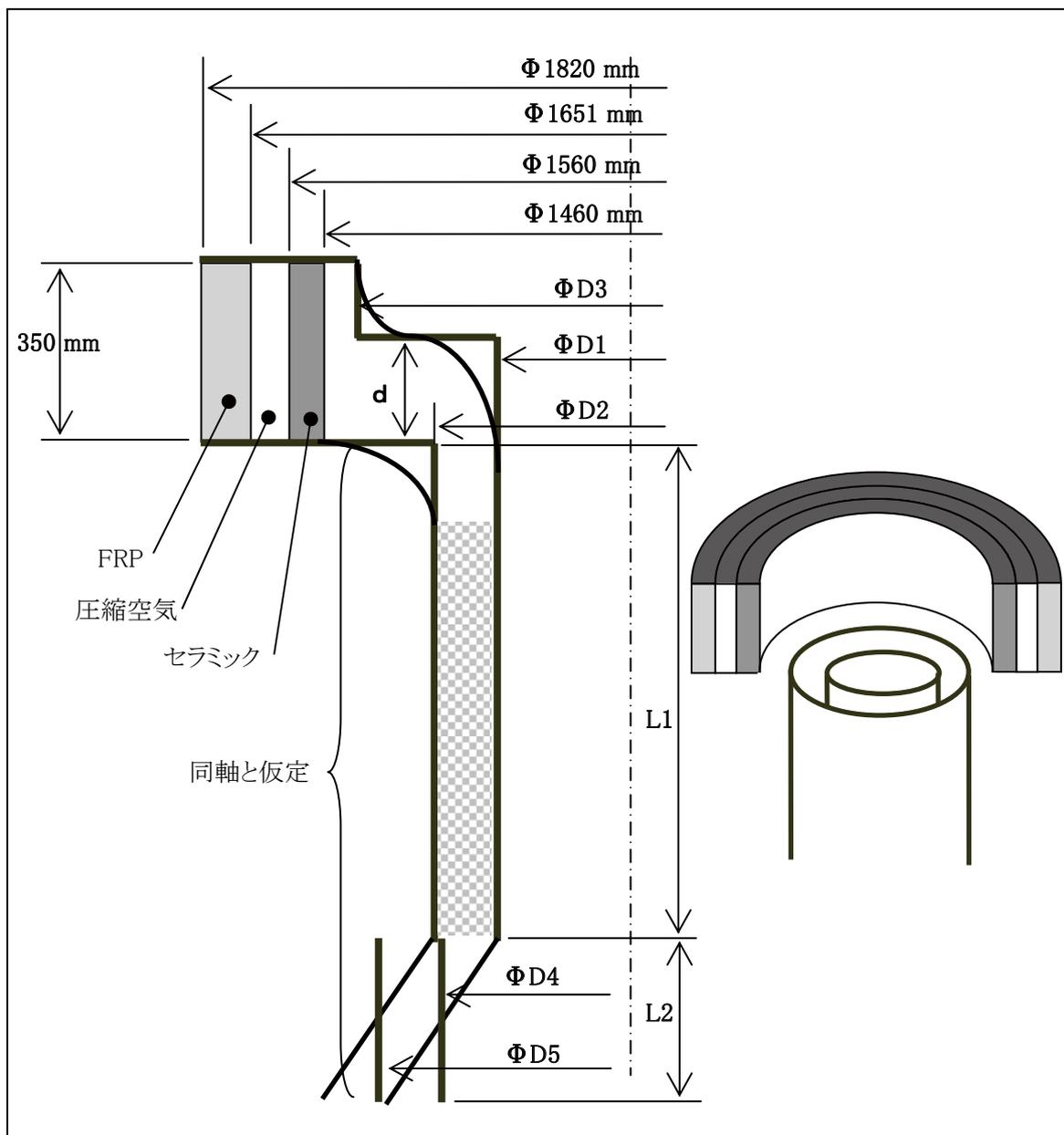


図 3.6.2-2 高電圧ブッシングの静電容量を計算するための概略図(寸法)

FRP 部、空気部、セラミック部の静電容量を 表 3.6.2-1 に示す。

表 3.6.2-1 FRP 部、空気部、セラミック部の静電容量

	比誘電率	C (pF)
セラミック部	8.5	51.0
空気部	1.00059	5.8
FRP 部	4.4	51.3

各電位の静電容量を 表 3.6.2-2 に示す。なお、total C は各電位の静電容量に、FRP 部、空気部、セラミック部の静電容量を加えた値である。

高電圧ブッシングのインダクタンスを計算するための概略図を 図 3.6.2-3 に示す。

表 3.6.2-2 各電位の静電容量

	D1 (mm)	D2 (mm)	L1 (mm)	D3 (mm)	d (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	L2 (mm)	C (pF)	total C (pF)
1-0.8MV	500	560	1860	1280	580	700	860	650	1128	1237
0.8-0.6MV	640	740	1440	1280	550	920	1120	700	764	872
0.6-0.4M	820	880	980	1280	440	1160	1380	800	1042	1150
0.4-0.2MV	960	1080	560	1280	320	1380	1520	800	726	834
0.2-0MV	1400	1680	480	-	-	-	-	-	147	255

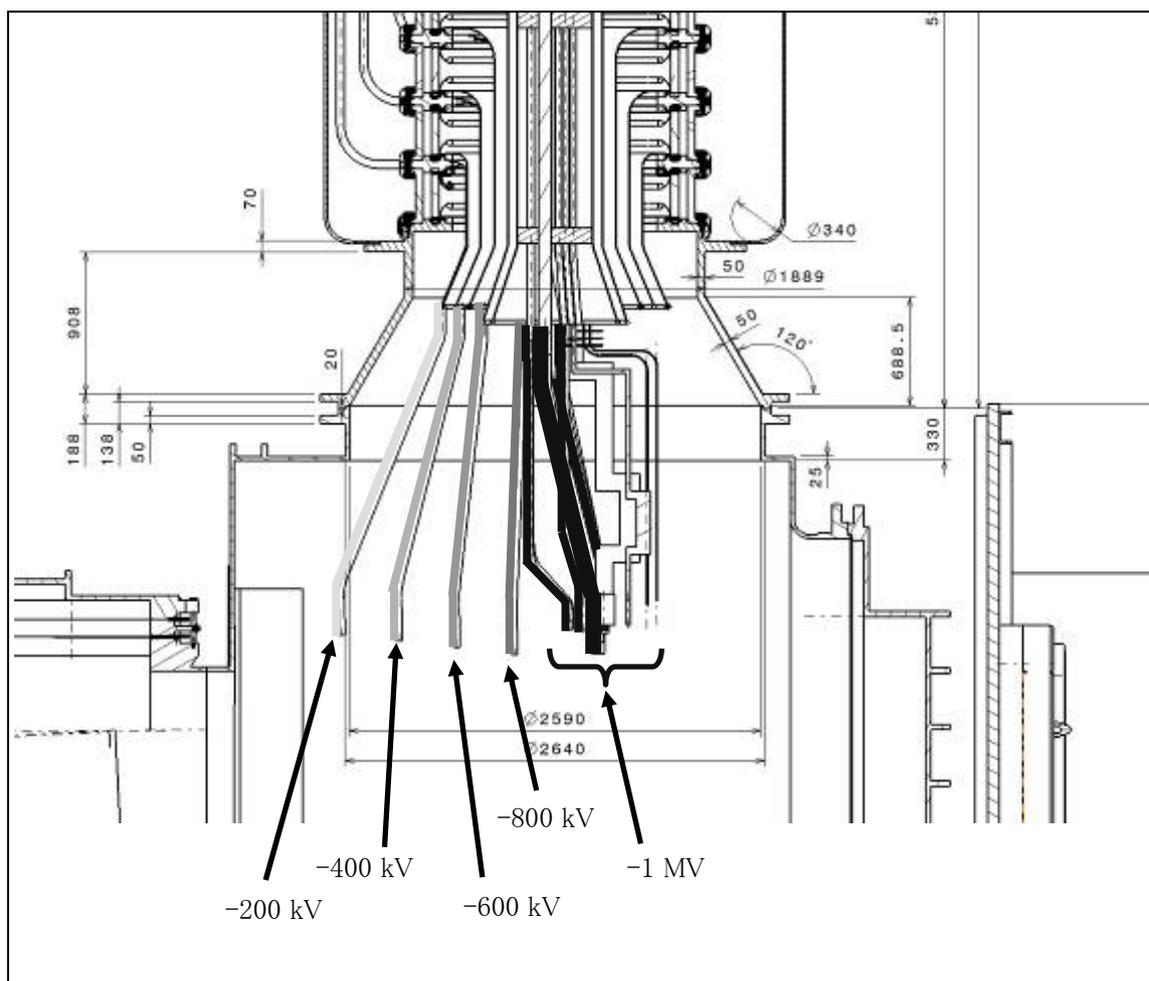


図 3.6.2-3 高電圧ブッシングのインダクタンスを計算するための概略図

インダクタンスを  $1 \mu\text{H}/\text{m}$  とし、長さを  $3 \text{ m}$  と仮定した。

$-800$ 、 $-600$ 、 $-400$ 、 $-200 \text{ kV}$  は各  $2$  本並列のため、各々  $1.5 \mu\text{H}$  と仮定した。

$-1 \text{ MV}$  は  $10$  本程度並列となるため、 $0.3 \mu\text{H}$  と仮定した。

### 3. 6. 3 リターンラインの抵抗、インダクタンスの見直し

高電圧ブッシングを追加するのに合わせ、リターンラインの抵抗値、インダクタンス値を見直し細分化を実施した。

リターンラインの抵抗値を見直した結果を 表 3.6.3-1 に示す。

リターンラインのインダクタンス値を見直した結果を 表 3.6.3-2 に示す。

表 3.6.3-1 リターンラインの抵抗値を見直した結果

抵抗値	内径(m)	厚み(mm)	長さ(m)	R(mΩ)
TL1	1.50	12	39.4	0.0694
TL2	1.69	12	59.8	0.0935
TL2(コア部)	2.37	15	11.0	0.0098
TL3(コア部)	2.37	15	5.5	0.0049
TL3	2.37	12	8.0	0.0089

表 3.6.3-2 リターンラインのインダクタンス値を見直した結果

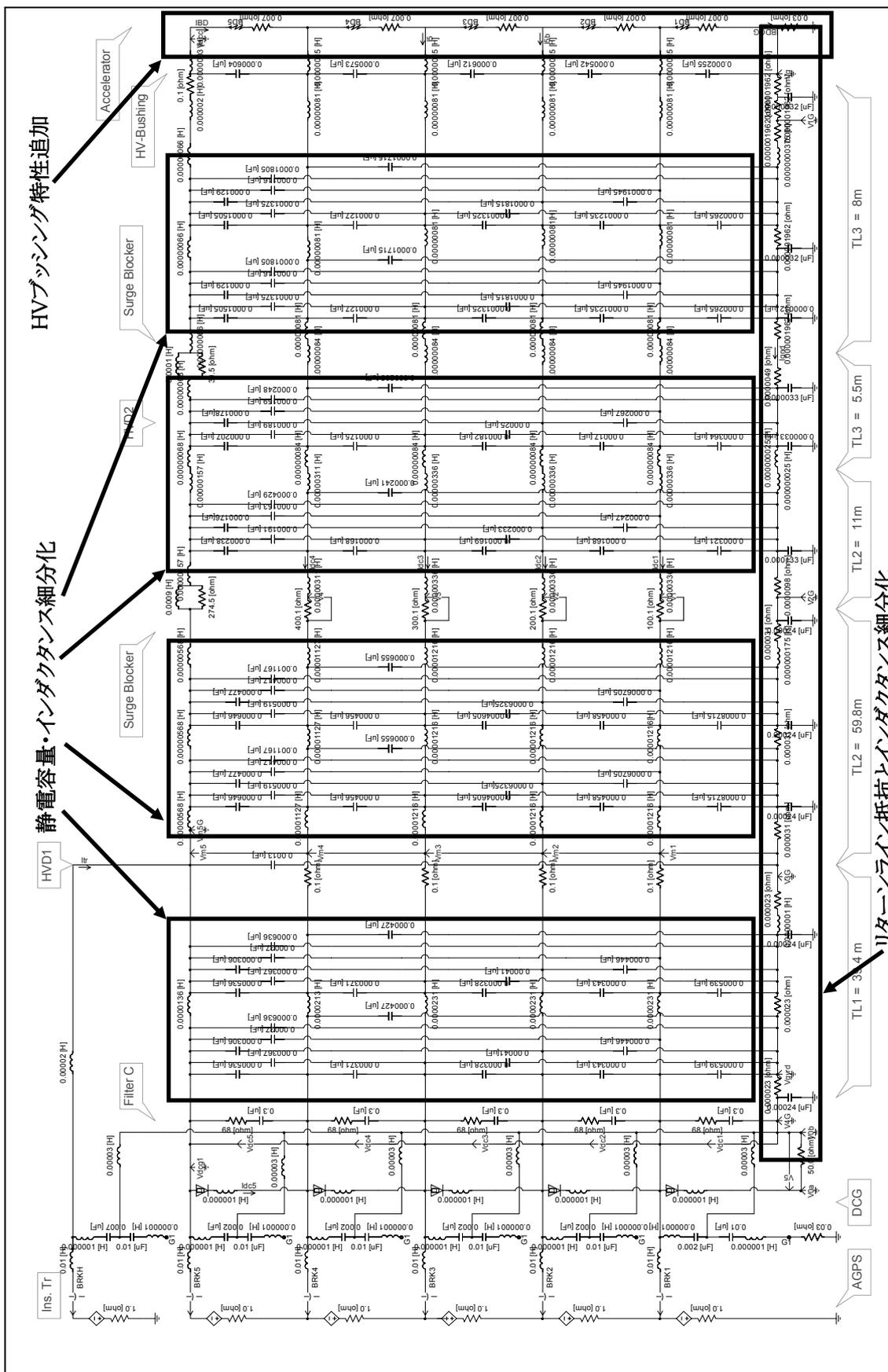
インダクタンス	接続箇所数*1	銅板数*2	L( $\mu\text{H}$ )
TL1	8	8	0.1000
TL2	14	8	0.1750
TL2(コア部)	2	8	0.0250
TL3(コア部)	2	8	0.0250
TL3	3	8	0.0375

\*1:トランスミッションラインは分割して製作され現地にて接続される。その接続箇所の予定数を示したものである。

\*2:トランスミッションラインの接続部は O リングによって絶縁される。ボルト、ナットで接続され導通しているが、さらに電導を良くするためにフランジに設ける銅板の予定枚数を示したものである。

### 3. 6. 4 等価回路

高電圧ブッシングの追加、リターンラインの細分化を実施した等価回路を図 3.6.4-1 に示す。また、回路全体の静電容量も細分化を実施している。



リターンライン抵抗とインダクタンス細分化  
図 3.6.4-1 等価回路

### 3.6.5 シミュレーション結果

高電圧ブッシングの追加、リターンラインの細分化を実施したシミュレーション結果の波形を 図 3.6.5-1～4 に示す。

図 3.6.5-1 は電流、電圧を示す。

図 3.6.5-2 は流入エネルギーを示す。流入エネルギーは 3.5 項で示した結果と大差のないことが分かった。

図 3.6.5-3 において、リターンライン保護抵抗電圧とは 3.2 項(ダイオードモデル、中間電位保護抵抗、リターンライン保護抵抗を追加した場合の検討)でのリターンラインに設けた 50 Ω の抵抗の前後にかかる電位差を示すものであり、40.7 kV が印加されることが分かる。抵抗はこの電位差に耐えられるものを準備する必要がある。

-800 kV～-200 kV 導体保護抵抗電圧とは 中間電位に設けた保護抵抗の前後にかかる電位差を示すものであり、-800 kV 電位の抵抗においては 1234 kV の電位差に耐えられるものを準備する必要がある。

図 3.6.5-4 において、-1 MV～ -800 kV 間ダイオード電流とは-1 MV と-800 kV 間のダイオードに流れる電流であり、1.55 kA 流れることが分かる。

-800 kV～-200 kV 導体電流(保護抵抗部)とは各中間電位保護抵抗に流れる電流であり、-800 kV 導体電流(保護抵抗部)では 3.1 kA の電流が流れる。

以上により、3.5 項(外管と内管の芯がずれた導体および並行で径の異なる導体の静電容量計算方式検討)までのシミュレーションに比べ、各電流、電圧が幾分大きくなることが分かった。そこで、以降のシミュレーションではこれらの回路定数の修正を加えて実施することにした。

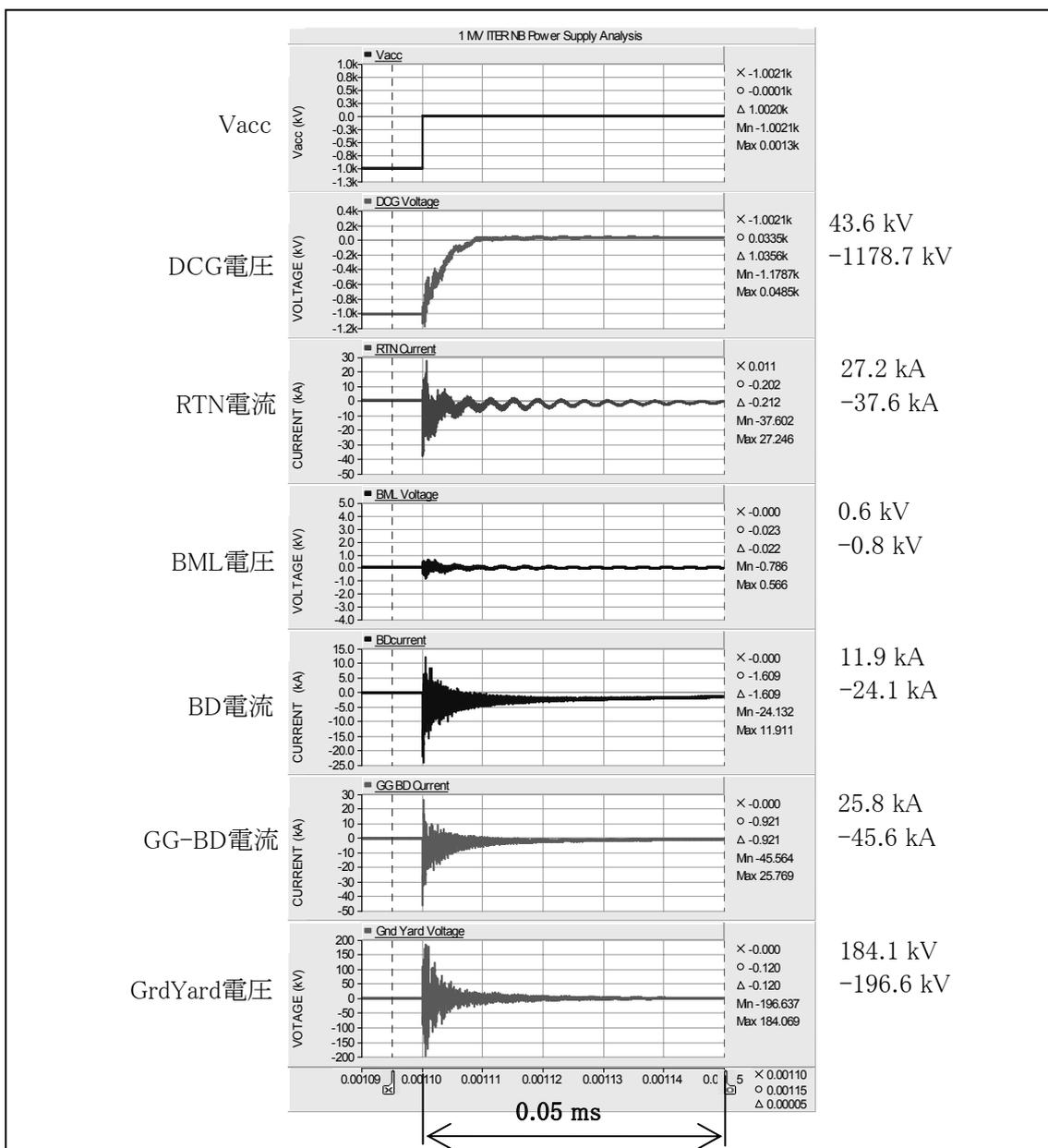


図 3.6.5-1 シミュレーション結果(その1)

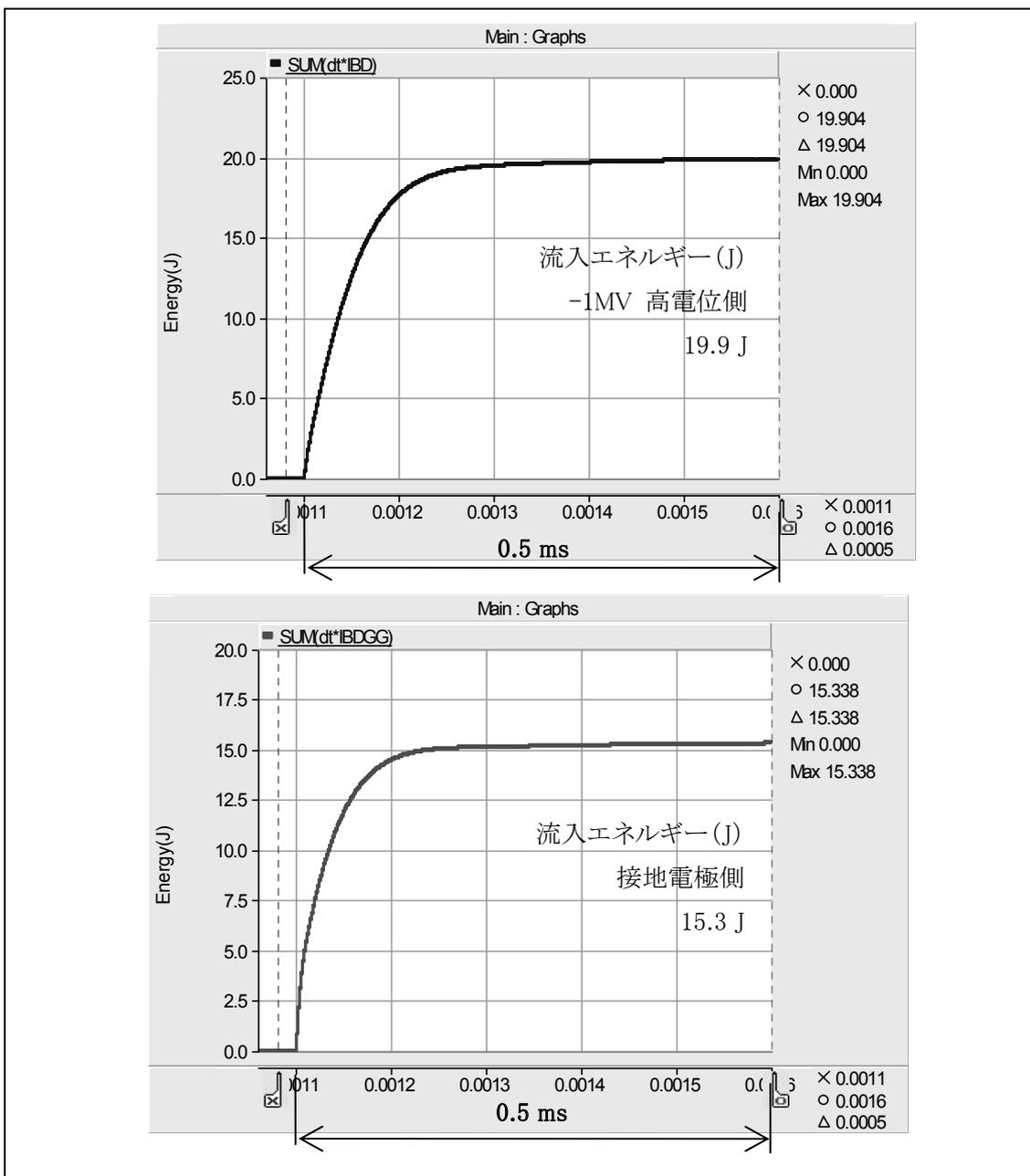


図 3.6.5-2 シミュレーション結果(その2)

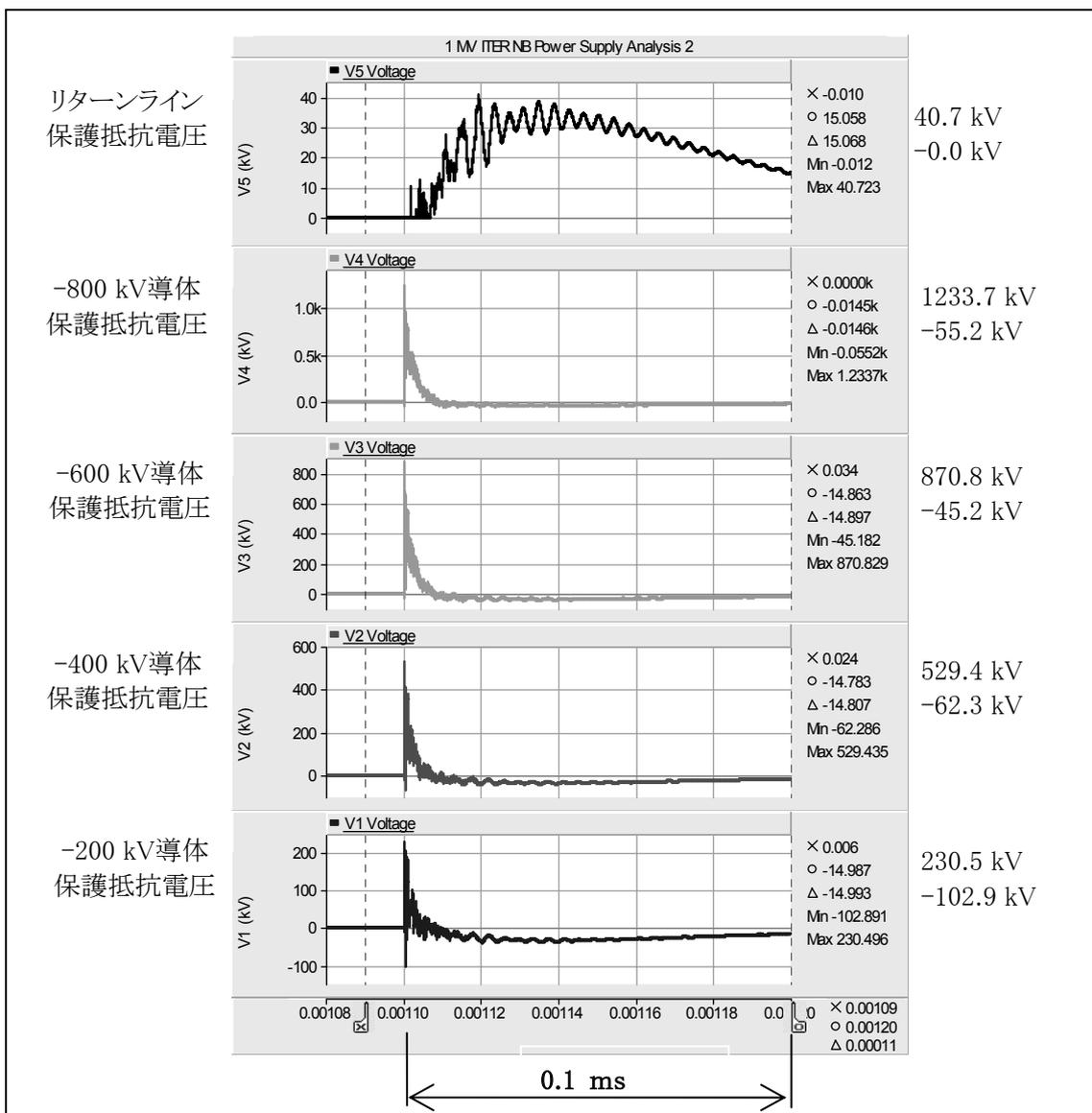


図 3.6.5-3 シミュレーション結果(その3)

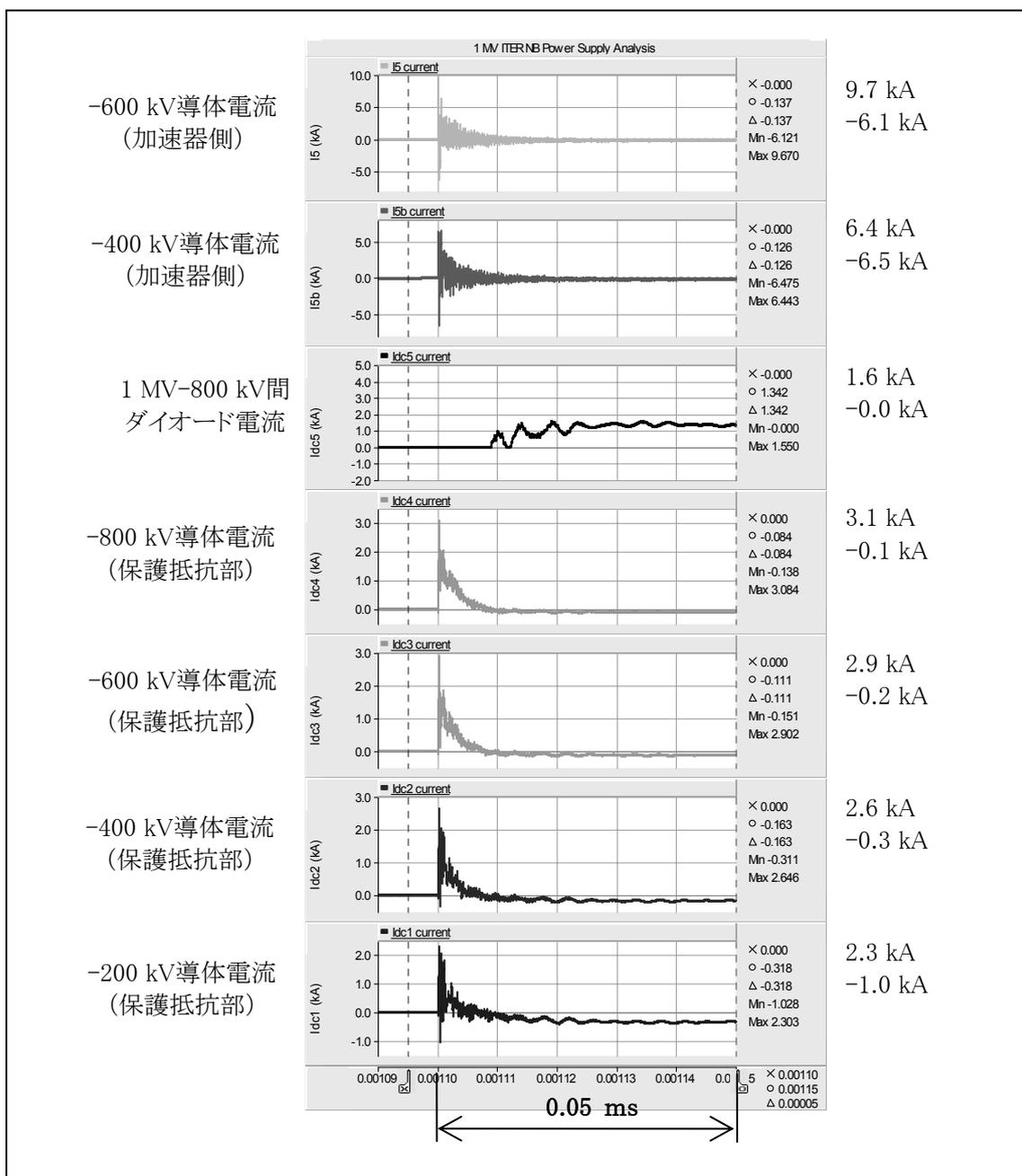


図 3.6.5-4 シミュレーション結果(その4)

### 3.7 最適化の検討

3.6 項(トランスミッションライン長さ、高電圧ブッシング静電容量およびインダクタンスの追加、リターンライン抵抗およびインダクタンスの検討)で示した回路定数に対し、以下の点について検討を追加した。

- (1) TL2、TL3 サージブロッカーのインダクタンス値および抵抗値、さらに 中間電位

保護抵抗値の値を変更した場合についてサージの比較検討を実施した。

- (2) インダクタンス値および抵抗値について、ブレークダウン時の各部電流、サージ電圧を極力小さくするような観点で検討した。
- (3) インダクタンス、抵抗の設置スペースを考慮し、現実の機器配置に則した等価回路について再検討した。

### 3. 7. 1 中間電位保護抵抗値の比較

中間電位保護抵抗値に関しては 表 3.7.1-1 に示す値について比較検討した。

中間電位保護抵抗値の比較検討結果を 表 3.7.1-2 に示す。振動波形のプラス側とマイナス側の最大値を示した。

中間電位保護抵抗値の比較検討結果(変化の大きいもの)を 図 3.7.1-1 に示す。

表 3.7.1-1 中間電位保護抵抗値比較検討表

抵抗値	-800 kV 導体	-600 kV 導体	-400 kV 導体	-200 kV 導体
ケース A1	400 Ω	300 Ω	200 Ω	100 Ω
ケース A2	300 Ω	225 Ω	150 Ω	75 Ω
ケース A3	200 Ω	150 Ω	100 Ω	50 Ω
ケース A4	100 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω

表 3.7.1-2 中間電位保護抵抗値比較検討結果表

ケース	A1	A2	A3	A4
DCG 電圧- (MV)	-1.1721	-1.1726	-1.1729	-1.1726
DCG 電圧+ (MV)	0.046	0.0452	0.0433	0.0465
RTN 電流- (kA)	-41.514	-41.527	-41.542	-41.557
RTN 電流+ (kA)	22.396	23.035	23.736	24.218
BML 電圧- (kV)	-0.854	-0.894	-0.949	-1.1031
BML 電圧+ (kV)	0.705	0.702	0.727	0.855
BD 電流(1MV)- (kA)	-27.194	-27.194	-27.195	-27.195
BD 電流(1MV)+ (kA)	9.04	9.253	9.667	10.587
BD 電流(ground)- (kA)	-42.907	-42.92	-42.934	-42.949
BD 電流(ground)+ (kA)	15.292	13.172	11.984	11.429
Grd Yard 電圧- (kV)	-170.67	-167.93	-163.94	-157.88
Grd Yard 電圧+ (kV)	162.78	166.21	170.55	176.2
流入エネルギー(1MV) (J)	16.044	17.119	19.338	25.826
流入エネルギー(ground)(J)	13.139	13.07	13.086	13.225
Diode 電流 (kA)	1.221	1.229	1.26	1.479

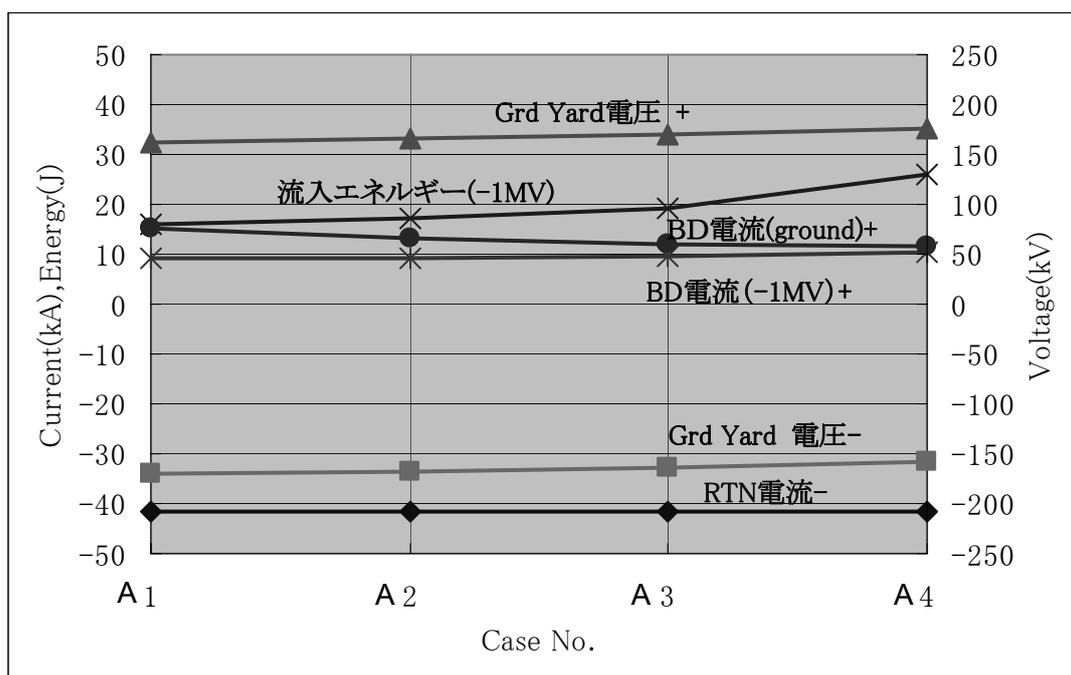


図 3.7.1-1 中間電位保護抵抗値の比較検討結果

各部のサージ電流、電圧および負荷への流入エネルギーが小さいものを選択すると、ケース A1 が最も良いと考えられる(ブレイクダウン電流(リターンライン)+とブレイクダウン電流(-1 MV ライン)+はケース A4 の方が良い)。ただし、中間電位保護抵抗の設置スペースの関係上、抵抗値を小さくする必要がある。エネルギーはケース A4 で 25.8 J となっているが、ITER 条件である 50 J 以下の値の約半分であり、条件を満足している。これらから、ケース A4 を推奨する。

### 3.7.2 TL3 サージブロッカー インダクタンス値の比較

TL3 サージブロッカーのインダクタンス値は 表 3.7.2-1 のケースにて比較検討した。

TL3 サージブロッカー インダクタンス値の比較検討結果を 表 3.7.2-2 および 図 3.7.2-1 に示す。

表 3.7.2-1 TL3 サージブロッカー インダクタンス値比較検討表

	TL2 インダクタンス	TL2 抵抗	TL3 インダクタンス	TL3 抵抗
ケース B1	700 $\mu$ H	100 $\Omega$	<b>100 <math>\mu</math>H</b>	50 $\Omega$
ケース B2	700 $\mu$ H	100 $\Omega$	<b>70 <math>\mu</math>H</b>	50 $\Omega$
ケース B3	700 $\mu$ H	100 $\Omega$	<b>50 <math>\mu</math>H</b>	50 $\Omega$

表 3.7.2-2 TL3 サージブロッカー インダクタンス値比較検討結果表

ケース	B1	B2	B3
DCG 電圧- (MV)	-1.1725	-1.1726	-1.1726
DCG 電圧+ (MV)	0.0407	0.0415	0.0465
RTN 電流- (kA)	-41.548	-41.552	-41.557
RTN 電流+ (kA)	24.39	24.311	24.218
BML 電圧- (kV)	-1.029	-1.03	-1.1031
BML 電圧+ (kV)	0.847	0.851	0.855
BD 電流(1MV)- (kA)	-27.195	-27.195	-27.195
BD 電流(1MV)+ (kA)	10.981	10.801	10.587
BD 電流(ground)- (kA)	-42.932	-42.939	-42.949
BD 電流(ground)+ (kA)	11.759	11.597	11.429
Grd Yard 電圧- (kV)	-157.98	-157.93	-157.88
Grd Yard 電圧+ (kV)	175.99	176.08	176.2
流入エネルギー(1MV) (J)	26.583	26.126	25.826
流入エネルギー(ground) (J)	13.338	13.283	13.225
Diode 電流 (kA)	1.354	1.346	1.479

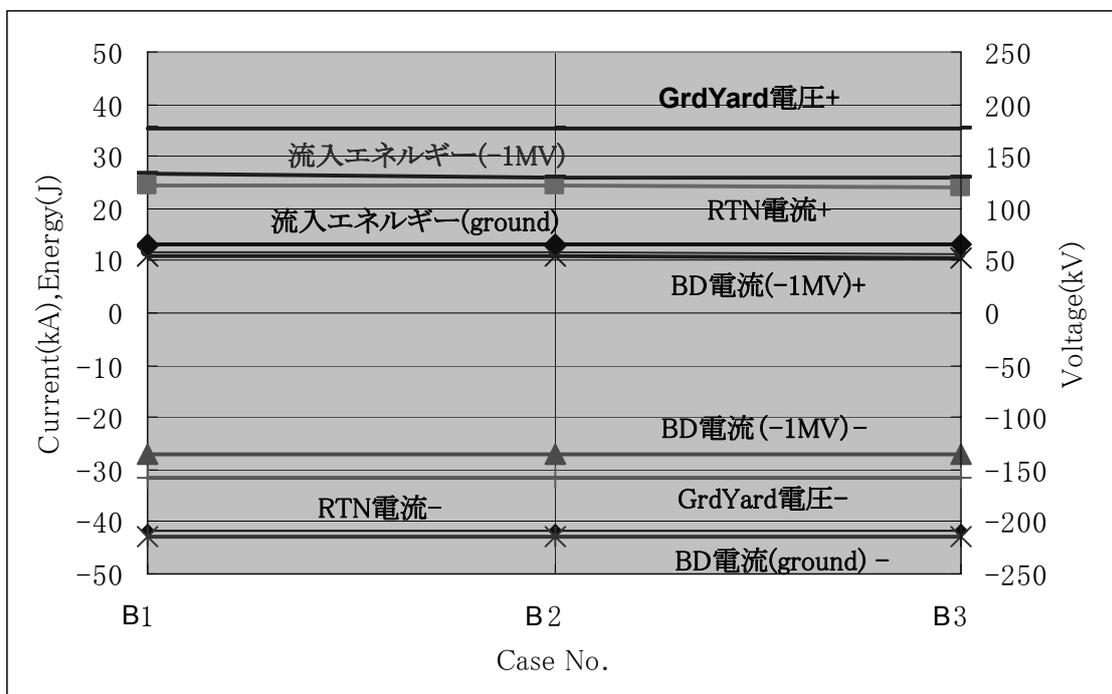


図 3.7.2-1 TL3 サージブロッカー インダクタンス値の比較検討結果

TL3 サージブロッカー インダクタンスを変更しても、各電流、電圧およびエネルギーに大きな変化はない。そのため、TL3 サージブロッカー インダクタンスの設置スペースの関係上からはケース B3 が推奨される。

3. 7. 3 TL3 サージブロッカー 抵抗値の比較

TL3 サージブロッカーの抵抗値は 表 3.7.3-1 のケースについて比較検討した。

TL3 サージブロッカー 抵抗値の比較検討結果を 表 3.7.3-2 に示す。

TL3 サージブロッカー 抵抗値の比較検討結果(変化の大きいものを)を 図 3.7.3-1 に示す。

表 3.7.3-1 TL3 サージブロッカー 抵抗値比較検討表

	TL2 インダクタンス	TL2 抵抗	TL3 インダクタンス	TL3 抵抗
ケース C1	700 $\mu$ H	100 $\Omega$	50 $\mu$ H	<b>50 <math>\Omega</math></b>
ケース C2	700 $\mu$ H	100 $\Omega$	50 $\mu$ H	<b>30 <math>\Omega</math></b>
ケース C3	700 $\mu$ H	100 $\Omega$	50 $\mu$ H	<b>10 <math>\Omega</math></b>

表 3.7.3-2 TL3 サージブロッカー 抵抗値比較検討結果表

ケース	C1	C2	C3
DCG 電圧- (MV)	-1.1726	-1.1793	-1.1909
DCG 電圧+ (MV)	0.0465	0.0442	0.0591
RTN 電流- (kA)	-41.557	-42.127	-42.896
RTN 電流+ (kA)	24.218	24.334	24.623
BML 電圧- (kV)	-1.1031	-1.063	-1.107
BML 電圧+ (kV)	0.855	0.889	0.947
BD 電流(1MV)- (kA)	-27.195	-27.195	-28.57
BD 電流(1MV)+ (kA)	10.587	12.532	15.122
BD 電流(ground)- (kA)	-42.949	-43.518	-44.392
BD 電流(ground)+ (kA)	11.429	13.407	16.516
Grd Yard 電圧- (kV)	-157.88	-162.61	-180.84
Grd Yard 電圧+ (kV)	176.2	182.23	191.6
流入エネルギー(1MV) (J)	25.826	25.867	26.156
流入エネルギー(ground) (J)	13.225	13.369	13.783
Diode 電流 (kA)	1.479	1.356	1.373

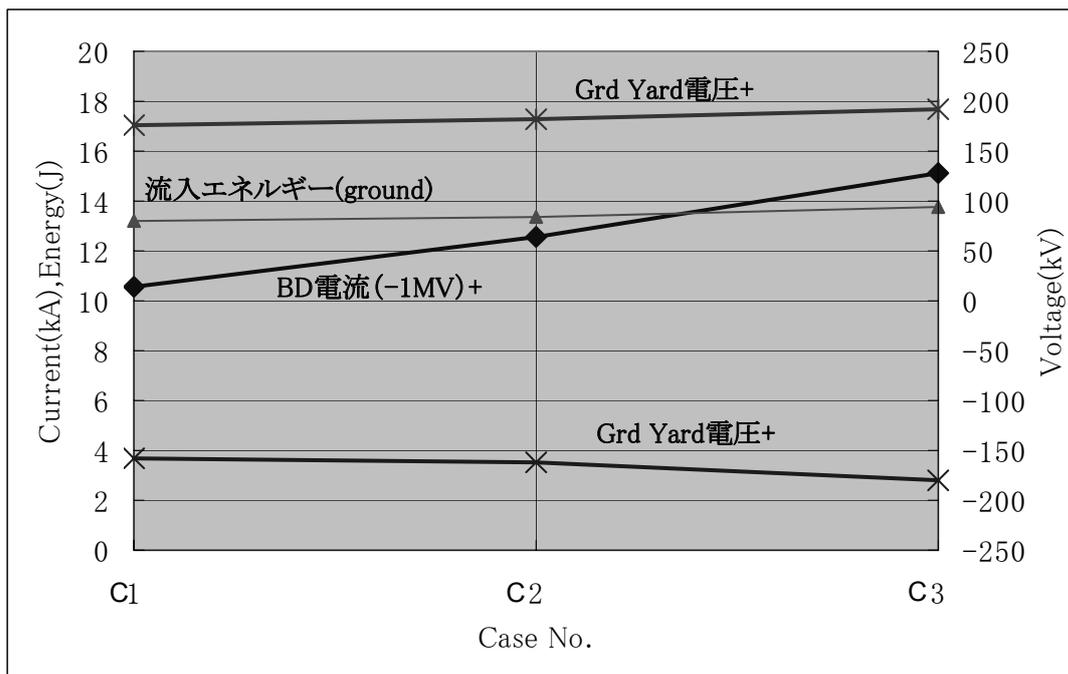


図 3.7.3-1 TL3 サージブロッカー 抵抗値の比較検討結果

各電流、電圧は TL3 サージブロッカーの抵抗を小さくした場合、大きくなっている。そのため、TL3 サージブロッカーの抵抗値に関してはケース C1 が推奨される。

なお、サージブロッカーのインダクタンス値と抵抗値の比はサージブロッカーの飽和を避ける値とした。

### 3.7.4 TL2 サージブロッカー インダクタンス値の比較

TL2 サージブロッカーのインダクタンス値は 表 3.7.4-1 のケースにて比較検討した。

TL2 サージブロッカー インダクタンス値の比較検討結果を 表 3.7.4-2 に示す。

TL2 サージブロッカー インダクタンス値の比較検討結果(変化の大きいもの)を 図 3.7.4-1~2 に示す。

表 3.7.4-1 TL2 サージブロッカー インダクタンス値比較検討表

	TL2 インダクタンス	TL2 抵抗	TL3 インダクタンス	TL3 抵抗
ケース D1	1000 $\mu$ H	100 $\Omega$	50 $\mu$ H	50 $\Omega$
ケース D2	700 $\mu$ H	100 $\Omega$	50 $\mu$ H	50 $\Omega$
ケース D3	500 $\mu$ H	100 $\Omega$	50 $\mu$ H	50 $\Omega$
ケース D4	300 $\mu$ H	100 $\Omega$	50 $\mu$ H	50 $\Omega$

表 3.7.4-2 TL2 サージブロッカー インダクタンス値比較検討結果表

ケース	D1	D2	D3	D4
DCG 電圧- (MV)	-1.1726	-1.1726	-1.1726	-1.1726
DCG 電圧+ (MV)	0.0382	0.0465	0.0547	0.0836
RTN 電流- (kA)	-41.557	-41.557	-41.557	-41.121
RTN 電流+ (kA)	24.24	24.218	24.188	24.121
BML 電圧- (kV)	-1.031	-1.1031	-1.032	-1.033
BML 電圧+ (kV)	0.856	0.855	0.857	0.856
BD 電流(1MV)- (kA)	-27.195	-27.195	-27.195	-27.195
BD 電流(1MV)+ (kA)	10.614	10.587	10.55	10.464
BD 電流(ground)- (kA)	-42.949	-42.949	-42.949	-42.949
BD 電流(ground)+ (kA)	11.569	11.429	11.299	10.926
Grd Yard 電圧- (kV)	-157.89	-157.88	-157.85	-157.8
Grd Yard 電圧+ (kV)	176.19	176.2	176.21	176.23
流入エネルギー(1MV) (J)	27.338	25.826	24.579	23.019
流入エネルギー(ground) (J)	13.535	13.225	12.959	12.628
Diode 電流 (kA)	1.168	1.479	2.278	3.744

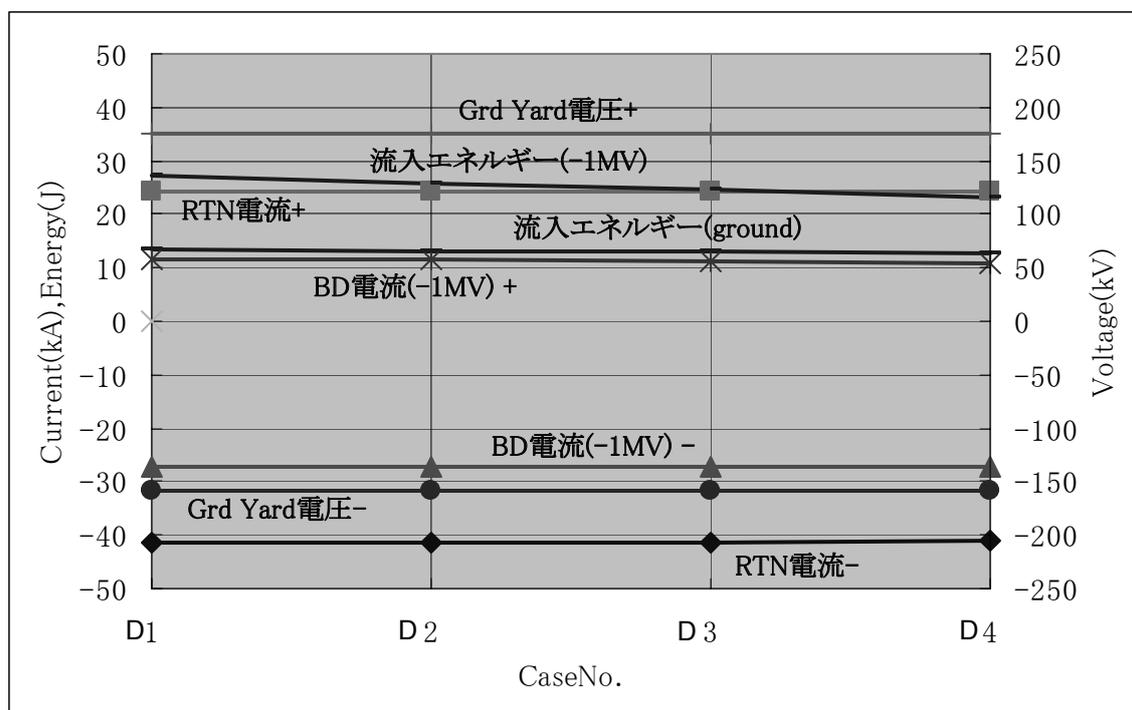


図 3.7.4-1 TL2 サージブロッカー インダクタンス値の比較検討結果(その1)

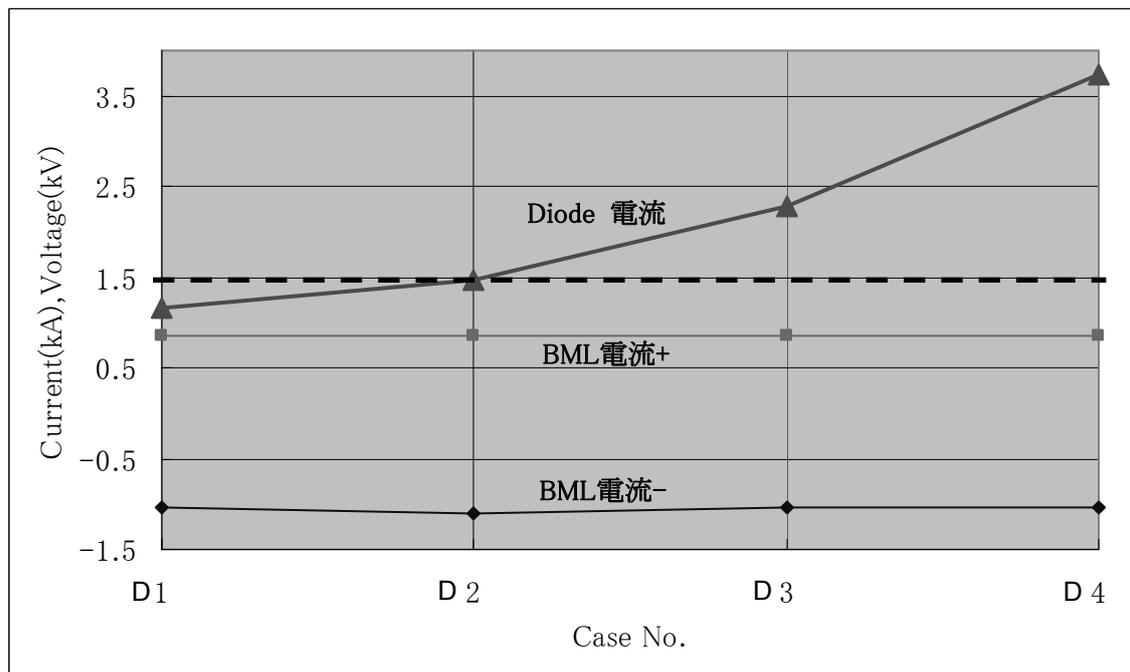


図 3.7.4-2 TL2 サージブロッカー インダクタンス値の比較検討結果(その 2)

TL2 サージブロッカーのインダクタンスを変更しても、ダイオード電流以外の各電流、電圧に大きな変化はない。しかしながら、ダイオード電流は TL2 サージブロッカーのインダクタンスが小さくなると大幅に大きくなっている。ケース D1 とケース D2 はダイオード電流が 1.5 kA 以下である。TL2 サージブロッカーのインダクタンスは設置スペースの関係上、小さくしたほうが良い。そのため、ケース D1 に比較的近いケース D2 を推奨する。

### 3. 7. 5 TL2 サージブロッカー 抵抗値の比較

TL2 サージブロッカーの抵抗値は 表 3.7.5-1 のケースにて比較検討した。

TL2 サージブロッカー 抵抗値の比較検討結果を 表 3.7.5-2 に示す。

TL2 サージブロッカー 抵抗値の比較検討結果(変化の大きいもの)を 図 3.7.5-1~2 に示す。

表 3.7.5-1 TL2 サージブロッカー 抵抗値比較検討表

	TL2 インダクタンス	TL2 抵抗	TL3 インダクタンス	TL3 抵抗
ケース E1	700 $\mu$ H	200 $\Omega$	50 $\mu$ H	50 $\Omega$
ケース E2	700 $\mu$ H	90 $\Omega$	50 $\mu$ H	50 $\Omega$
ケース E3	700 $\mu$ H	50 $\Omega$	50 $\mu$ H	50 $\Omega$

表 3.7.5-2 TL2 サージブロッカー 抵抗値比較検討結果表

ケース	E1	E2	E3
DCG 電圧- (MV)	-1.1709	-1.1726	-1.1731
DCG 電圧+ (MV)	0.044	0.0465	0.0944
RTN 電流- (kA)	-41.533	-41.557	-41.723
RTN 電流+ (kA)	24.666	24.218	23.88
BML 電圧- (kV)	-0.946	-1.1031	-1.07
BML 電圧+ (kV)	0.744	0.855	0.922
BD 電流(1MV)- (kA)	-27.194	-27.195	-27.195
BD 電流(1MV)+ (kA)	13.371	10.587	8.459
BD 電流(ground)- (kA)	-42.927	-42.949	-42.959
BD 電流(ground)+ (kA)	11.955	11.429	11.813
Grd Yard 電圧- (kV)	-160.18	-157.88	-156.62
Grd Yard 電圧+ (kV)	171.56	176.2	179.04
流入エネルギー(1MV) (J)	28.867	25.826	23.856
流入エネルギー(ground) (J)	13.629	13.225	13.091
Diode 電流 (kA)	1.622	1.479	2.834

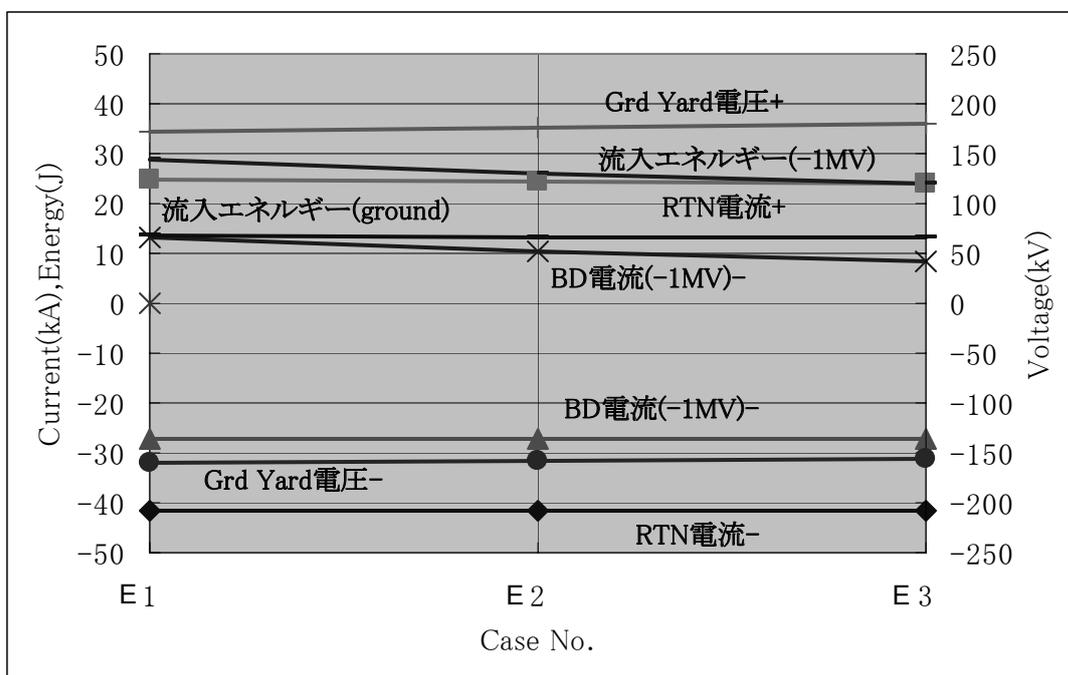


図 3.7.5-1 TL3 サージブロッカー 抵抗値の比較検討結果(その1)

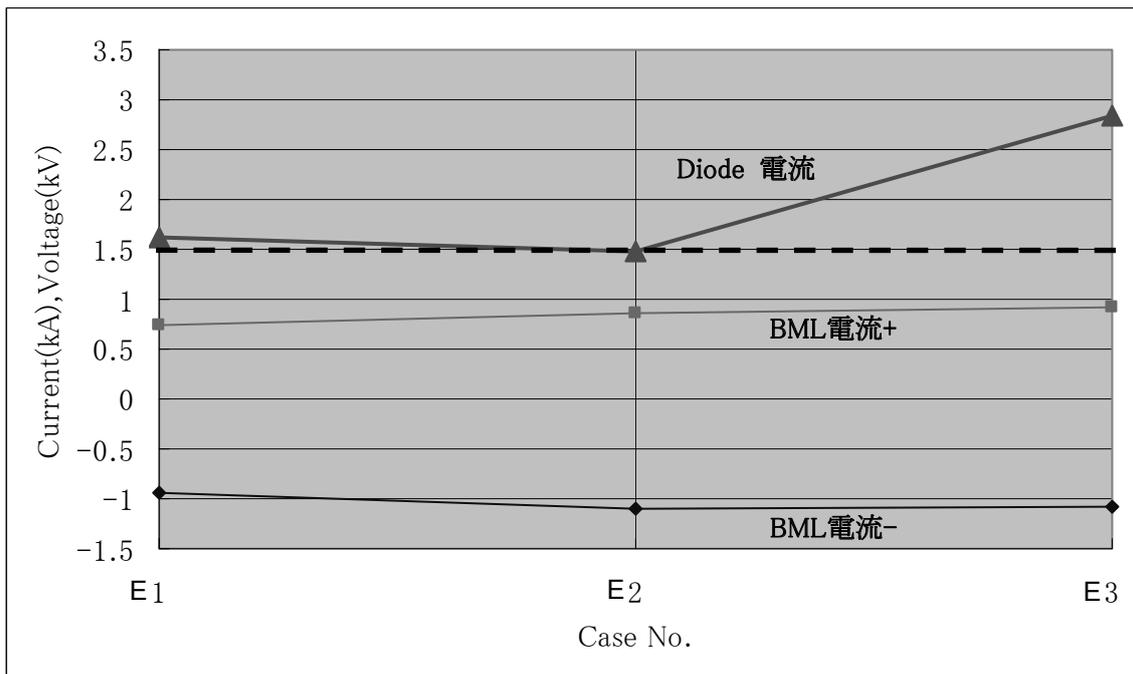


図 3.7.5-2 TL2 サージブロッカー 抵抗値の比較検討結果(その2)

TL2 サージブロッカーの抵抗を変更しても、ダイオード電流以外の各電流、電圧に大きな変化はない。しかしながら、ダイオード電流は TL2 サージブロッカーの抵抗がケース E2 以外になると大きくなっている。そのため、ケース E2 を推奨する。

### 3. 7. 6 最適化検討の等価回路

3. 7. 1から3. 7. 5までの検討を考慮し、中間電位保護抵抗、TL2 および TL3 サージブロッカーの抵抗値およびインダクタンス値として 表 3.7.6-1～2 に示す値を推奨する。よって、等価回路を図 3.7.6-1 のように設定した。

表 3.7.6-1 中間電位保護抵抗値表

	-800 kV 導体	-600 kV 導体	-400 kV 導体	-200 kV 導体
推奨値	100 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω

表 3.7.6-2 TL2 および TL3 サージブロッカー インダクタンス、抵抗値表

	TL2 インダクタンス	TL2 抵抗	TL3 インダクタンス	TL3 抵抗
推奨値	700 μH	90 Ω	50 μH	50 Ω



### 3.7.7 シミュレーションの結果

最適化検討のシミュレーション結果の波形を 図 3.7.7-1～4 に示す。

図3.7.7-1は電流、電圧を示す。3.6項(トランスミッションライン長さ、高電圧ブッシング静電容量およびインダクタンスの追加、リターンライン抵抗およびインダクタンスの検討)の検討結果に比べ、電源電圧のプラス側が若干大きくなっている。(43.6 kV → 46.5 kV) それ以外は、小さくなっており(例えば、ブレイクダウン電流(1MV ライン)プラス側 11.9kA → 10.6kA、ブレイクダウン電流(リターンライン)プラス側 25.8kA → 11.4kA、リターン電圧プラス側 184.1kV → 176.2kV)、改善されている。

図 3.7.7-2 は流入エネルギーを示す。3.6 項の結果と比較すると、-1 MV 高電位側で見た流入エネルギーが大きくなっている。(19.9 J → 25.8 J) ただし、ITER の規定値 50 J に比べ、約半分の値であり、許容範囲である。接地電位側で見た流入エネルギーは小さくなっている。(15.3 J → 13.2 J)

図3.7.7-3は各保護抵抗にかかる電圧を示したものである。3.6項の結果と比較すると、リターンライン保護抵抗電圧が倍以上大きくなっている。(40.7 kV → 86.5 kV) ただし、各電位(-800 kV、-600 kV、-400 kV、-200 kV) 導体保護抵抗電圧は半分以下に下がっている。各電位の導体保護抵抗はトランスミッションラインの中に設置する必要があるため、極力小さくする必要がある。一方リターンライン保護抵抗はトランスミッションライン外に設置するため、各電位の導体保護抵抗ほど厳しくする必要はない。

図3.7.7-4は各保護抵抗およびダイオードに流れる電流を示したものである。3.6項の結果と比較すると、1 MV-800 kV 間ダイオード電流は小さくなっている。(1.6 kA → 1.5kA) ダイオードには容量制限があるため、ダイオード電流を極力小さくする必要があり、本結果の方が望ましい。

各電位(-800 kV、-600 kV、-400 kV、-200 kV) 導体電流(保護抵抗部)の値が大きくなっている。しかしながら、3.6 項での結果に比べ、約半分の時間で収束しており、流入エネルギー抑制の観点から本条件の方が良いと言える。

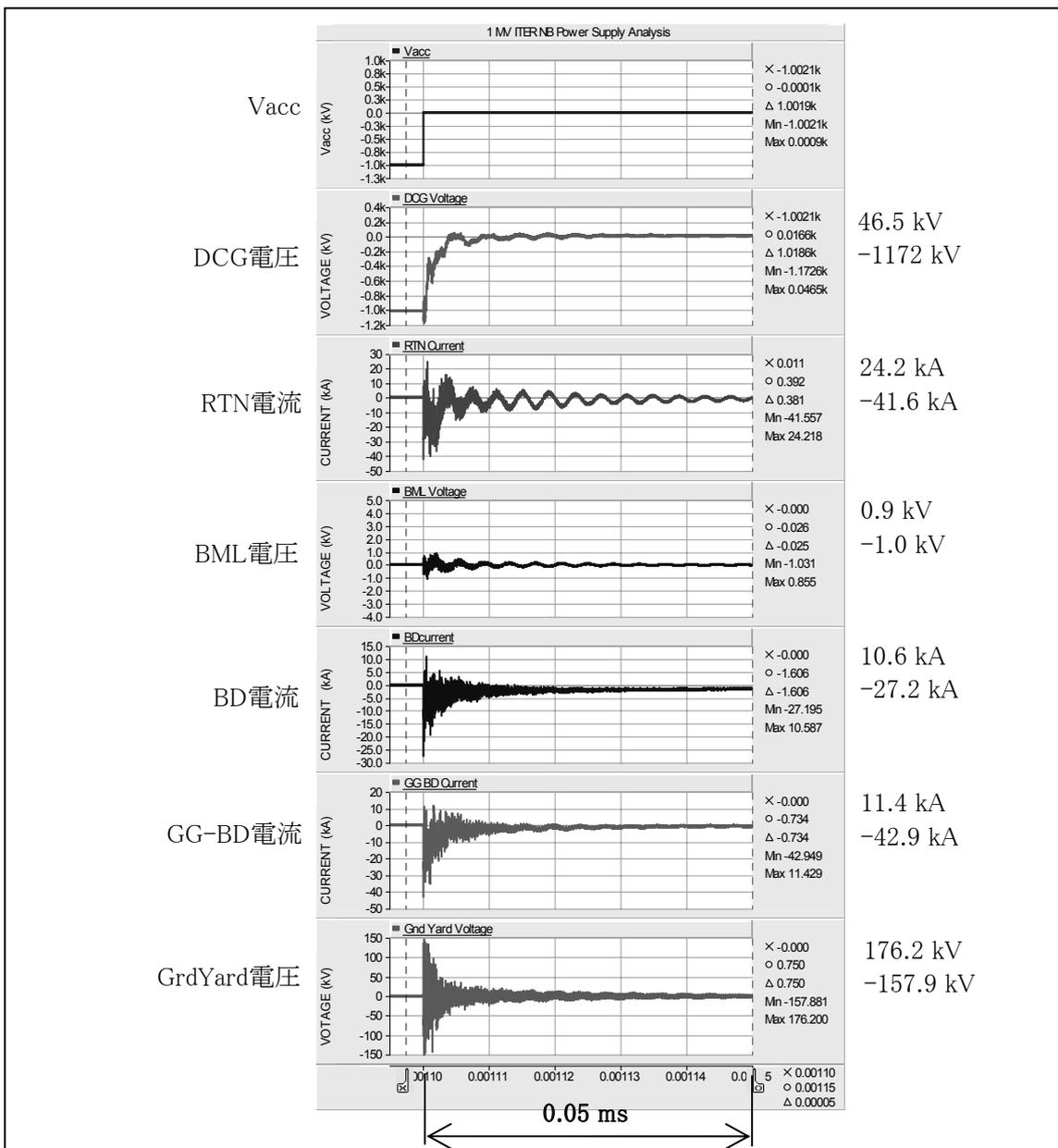


図 3.7.7-1 シミュレーション結果(その1)

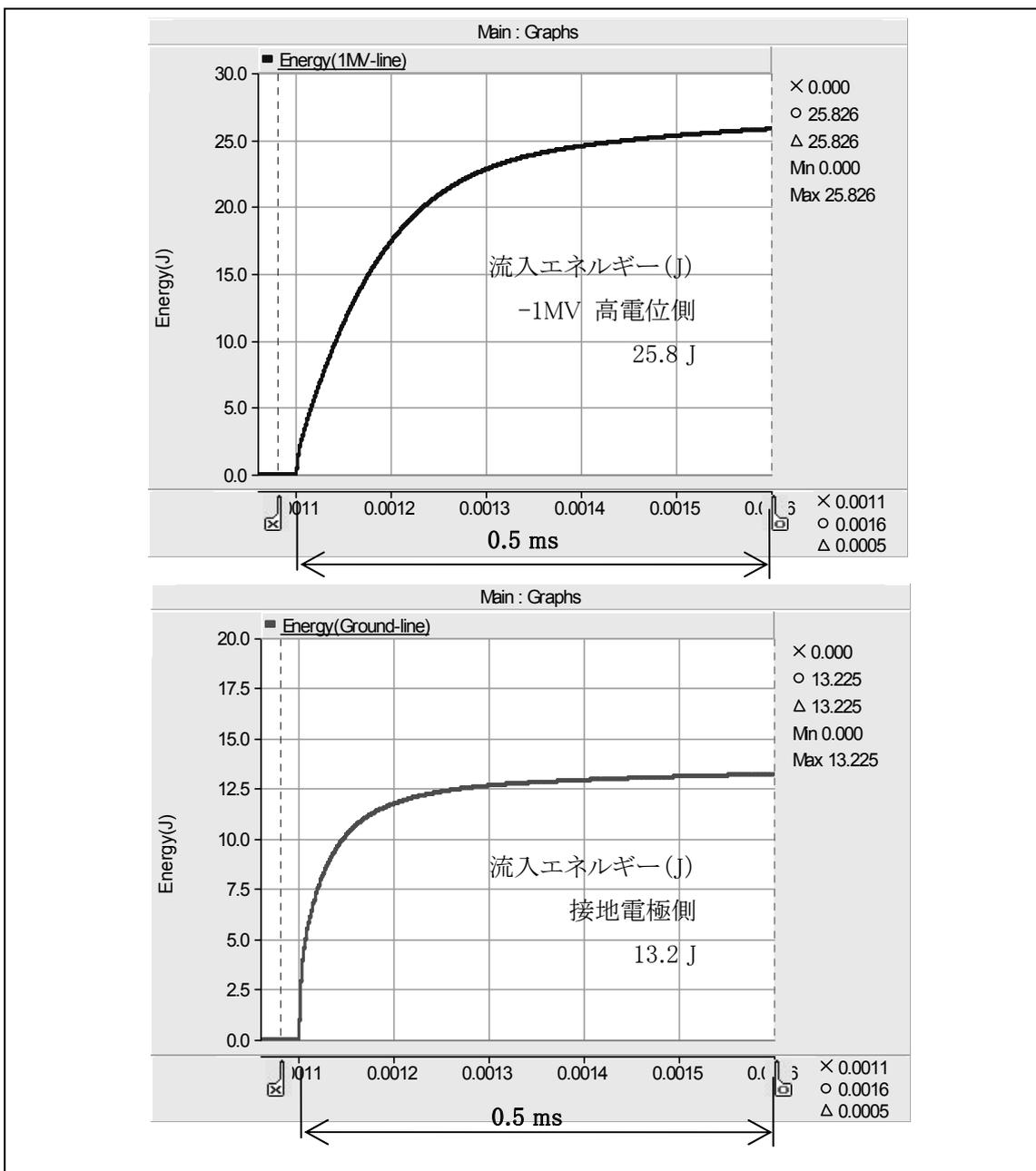


図 3.7.7-2 シミュレーション結果(その2)

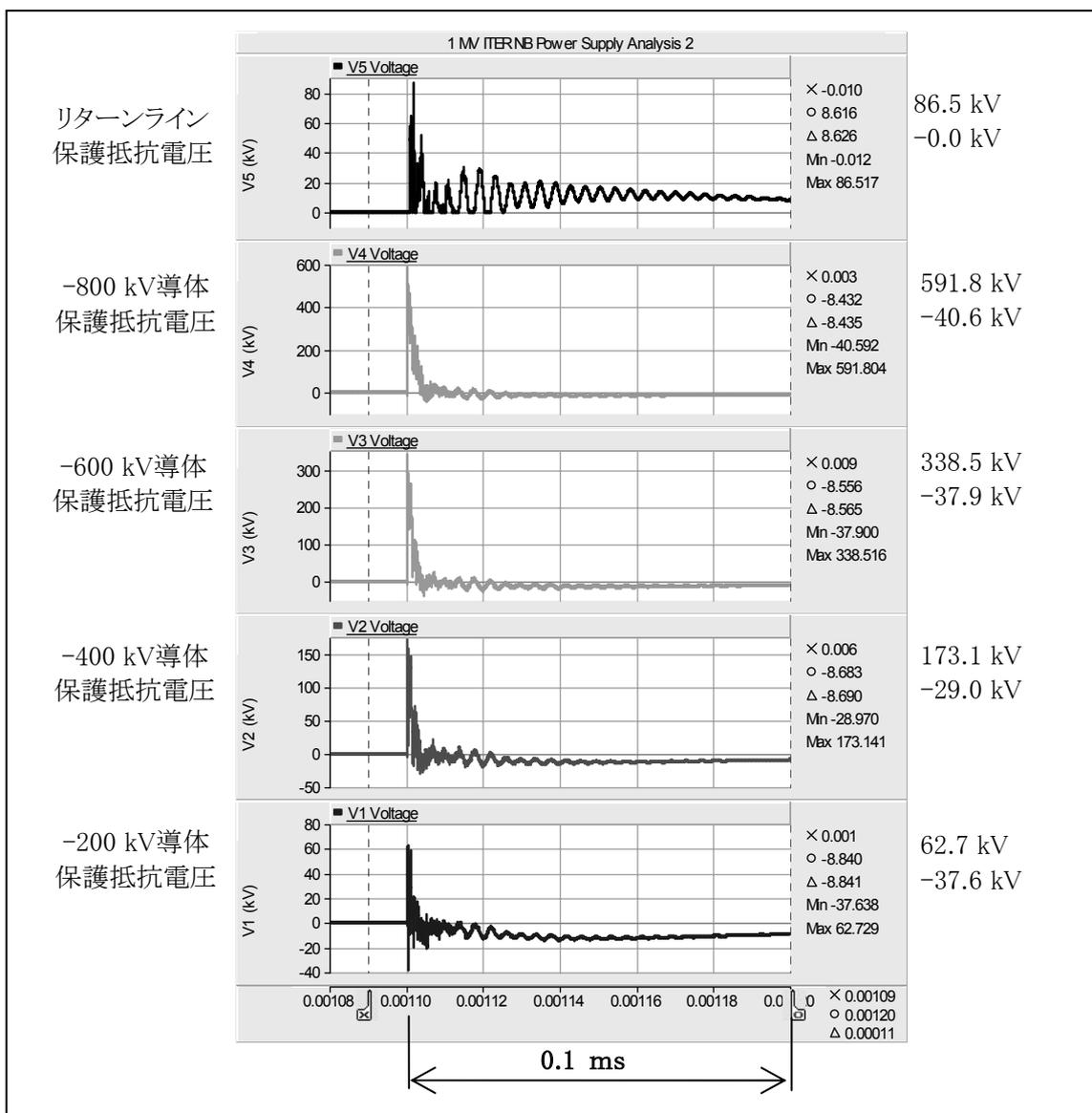


図 3.7.7-3 シミュレーション結果(その3)

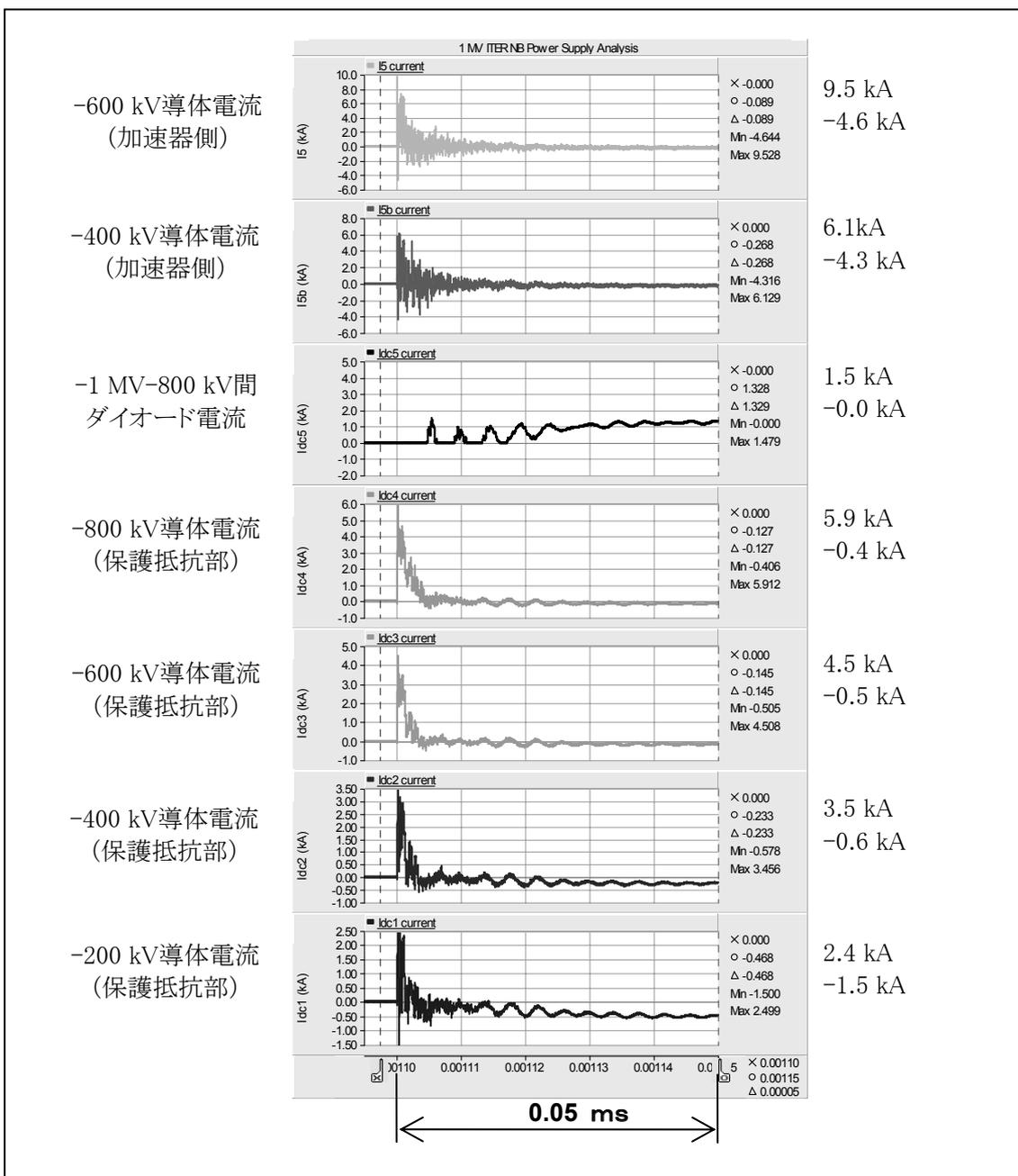


図 3.7.7-4 シミュレーション結果(その4)

### 3.8 検討結果

結果として、表 3.8-1 に示す TL2 の中間電位保護抵抗、表 3.8-2 に示す TL2 および TL3 サージブロッカーのインダクタンスと抵抗値、また、リターンラインに 50 Ω の保護抵抗を設けることで、ITER の規定値である流入エネルギー 50 J に対し、約半分の 25 J に抑制できる。また、ダイオード電流は 1.5 kA と抑えることができ、各中間電位保護抵抗にブレークダウン時にかかる電位も 600 kV 以下に抑えることができています。

表 3.8-1 TL2 の中間電位保護抵抗値表

	-800 kV 導体	-600 kV 導体	-400 kV 導体	-200 kV 導体
推奨値	100 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω

表 3.8-2 TL2 および TL3 サージブロッカー インダクタンス、抵抗値表

	TL2 インダクタンス	TL2 抵抗	TL3 インダクタンス	TL3 抵抗
推奨値	700 μH	90 Ω	50 μH	50 Ω

### 4. まとめ

ITER 用 NBI 電源において負荷短絡が発生した場合のサージ特性について、等価回路を作成し、回路解析コード EMTDC を使用して解析を実施した。当初の等価回路から機器設計の進捗に従い、より実際の回路に近づけるように次のような検討を行った。

- 回路定数、即ち各導体の静電容量やインダクタンスの細分化の実施
- リターンラインのインダクタンスと抵抗値の細分化の実施
- 高電圧ブッシングの静電容量とインダクタンスの追加等の見直しの実施
- 以上を踏まえた解析により、現状のITER配置の条件で、サージブロッカーの配置、定数、中間電位保護抵抗値の検討（主な保護抵抗は、リターンライン保護抵抗に 50 Ω、中間電位保護抵抗-800 kV ラインに 100 Ω、-600 kV ラインに 75 Ω、-400 kV ラインに 50 Ω、-200 kV ラインに 25 Ω、TL3 サージブロッカーのインダクタンスに 50 μH、並列抵抗に 50 Ω、TL2 サージブロッカーのインダクタンスに 90 μH、並列抵抗に 50 Ωとした。）

以上の検討により、以下の結論を得た。

- ◆ 放電破壊時に電源から加速部への流入エネルギーを約 25 J 程度に抑制できることを確認できた。ITER の要求値は 50 J 以下である。
- ◆ 放電破壊後に直流発生器のダイオードに流れる電流を 1.5 kA に抑制できることを確認できた。これによって、使用するダイオードのサージ耐量を抑えることが可能となる。
- ◆ 放電破壊時に-1 MV 高電圧ラインに流れるブレークダウン電流は+10.6 kA /-27.2 kA 程度に抑制できることが分かった。
- ◆ 放電破壊時にリターンラインに流れるブレークダウン電流は+11.4 kA /-42.9 kA に抑制で

きることが分かった

- ◆ 放電破壊時のリターンラインの電位変動は $\pm 200$  kV 以下に抑制できることが分かった。

以上のように、サージブロッカーや抵抗素子の配置や定数を最適化することにより、ITER 用 NBI 電源における要求性能を満足するサージ抑制機能の実現の見通しを得た。

なお、今回の検討においては、トランスミッションライン内導体の相互インダクタンスは考慮していない。これは導体が立体的な多導体配置であり相互インダクタンスモデルの複雑さのためと、各導体に挿入した抵抗素子等のサージ特性への効果に比べて影響が小さいものと考えられるからである。しかし、今後より詳細な回路解析においては、相互インダクタンスのモデル検討も含めて課題として検討を進めていく予定である。

#### 謝 辞

本研究にあたり、有意義な議論や助言を頂いた核融合エネルギー工学研究開発ユニット加熱工学研究グループの坂本慶司グループリーダーをはじめとする諸氏に感謝致します。また、本件に関する研究開発を行う機会と激励をいただきました秋場真人核融合エネルギー工学研究開発ユニット長、芳野隆治 ITER プロジェクトユニット長、二宮博正核融合研究開発部門長に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] Hemsworth R.S. , : “Long pulse neutral beam injection”, Nucl. Fusion 43 851-61 (2003).
- [2] Manitoba HVDC Research Centre, Electromagnetic transients and controls simulation code PSCAD/EMTDC.  
<http://pscad.com/>
- [3] K. Watanabe, M. Yamamoto, J. Takemoto, Y. Yamashita, M. Diraku, M. Kashiwagi, M. Taniguchi, H. Tobar, N. Umeda, K. Sakamoto and T. Inoue : “Design of a -1 MV dc UHV power supply for ITER NBI”, Nucl. Fusion 49 (2009) 055022 (5pp).
- [4] K. Watanabe, O. Higa, S. Kawashima, Y. Ohara, Y. Okumura, Y. Ono, M. Tanaka and S. Yasutomi : “Design of ITER NBI Power Supply System”, JAERI-Tech 97-034 (1997).
- [5] K. Watanabe, M. Kashiwagi, S. Kawashima, Y. Ono, Y. Yamashita, C. Yamazaki, M. Hanada, T. Inoue, M. Taniguchi, Y. Okumura and K. Sakamoto, “Development of a dc 1 MV power supply technology for NB injectors”, Nucl. Fusion 46(2006) S332-S339.
- [6] 後藤憲一・山崎修一郎 : 「詳解 電磁気学演習」, 共立出版株式会社、(1994), pp119-120.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	ジュール毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バトン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベクレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

