PNC-TJ9055 97-003

高速炉安全性試験炉

試験体ループの熱構造計算

（動力炉・核燃料開発事業団　契約業務報告書）

技術管理室
No
9. 8. -5
動燃事業団大洗工学センター

1997年3月

川崎重工業株式会社

複製又はこの資料の入手については，下記にお問い合わせください。
〒311-13　茨城県東茨城郡大洗町成田町4002
動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター　システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団（Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation）

PNC-TJ9055 97-003

１９９７年３月

高速炉安全性試験炉

試験体ループの熱構造計算

下田　貞之*、亀ヶ谷勝彦*

矢野　和隆**、前川　　勇***

要　　旨

ＴＯＰ、ＬＯＦ等に伴う炉心崩壊事故について、液体金属冷却高速増殖炉の安全性評価を行うためには、燃料の破損限界、燃料溶融挙動、溶融燃料プール挙動、及び機械的放出エネルギー量の定量的把握が必要不可欠である。

これらの現象を定量的に把握する手段は実機の使用状態に近い条件を模擬したＮａループによる実験であり、動力炉・核燃料開発事業団ではＳＥＲＡＰＨ計画の下に前記の条件を満たす試験体ループの概念検討に着手している。

試験体ループについては、これまでに「炉内試験体の調査および構造強度計算」(1994 年度)、「炉内試験体の熱収支計算と成立性調査」(1995 年度)の検討を行ってきた。

本報告書は、炉外Ｎａループ形式概念に基づく試験体切り離し構造及び外付き

本報告書は、川崎重工業株式会社が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号：　08C5654

事業団担当部課室：大洗工学センター　安全工学部　機器・構造安全工学室

事業団担当者：西浦　健夫

* 川崎重工業(株)　原子力本部　プロジェクト第一部

** 川崎重工業(株)　原子力本部　開発部

*** 川崎重工業(株)　原子力本部　技術部

試験ループ全体の工学的成立性の検討をまとめたものであり、主要な成果は以下の通りである。

（1）試験体の切り離し構造に関し、以下の４つの構造概念を検討した。

① １次容器一体型試験体

② １次容器切り離し型試験体

③ 仕切管上下切り離し型試験体

④ 燃料試験部切り離し型試験体

その結果、一体型試験体に比較して取扱い長さが約半分(約６ m)で消耗部材が大幅に低減出来る合理的試験体の構造の成立性を得た。

（2）上記の合理的構造の試験体を炉内に挿入、引き抜き出来る取扱い設備の概略構造検討と試験体の据付手順についての検討を行い、炉内構造物を扱う上では常識的な取扱い設備対応で据付が可能であることを把握した。

（3）試験ループの系統としての工学的成立性について諸観点から検討を実施した。試験部で発生する熱を空気式熱交換器等で除熱冷却し、閉ループにてヒートバランスを保持する系統構成の Na ループは試験条件の実現性、安全性、設備の規模及び配置の成立性等の観点から実現は困難なものと判断された。それに代わるループ構成として MAKE UP タンク方式のループについて検討し、限定した一定時間内での試験条件の実現性、発生熱量の吸収性、設備の配置の簡素化（集中配置の可能性）等の観点から十分合理的で成立性あるものと判断された。

（4）長尺構造物の試験体の強度的成立性の要件として耐震強度があるが、その成立性判断の一つの目安として試験体の固有振動数の計算を実施した。１次容器／２次容器／外容器／試験孔をバネ剛性の支持点で連成させた計算を行い、支持点バネ定数が振動特性に大きく影響することが判明した。

耐震性の観点から固有振動数は２０ Hz 以上を確保したいが、このためには支持点のバネ定数は 5000 kg /mm 以上が必要である。支持点バネ定数が 10000 kg/mm あれば試験体の１次固有振動数は約２７ Hz を確保出来ることが解った。

目　次

	頁
要　旨	I
目　次	III
図表リスト	V
1．背景と目的	1
2．試験体切り離し構造に関する検討	2
2.1　試験体構造の具体化	2
2.1.1　切り離し方式の種類と構造概念	3
2.1.2　各方式の特徴比較	7
2.2　試験体取扱い設備に関する検討	7
2.2.1　必要な取扱い設備	7
2.2.2　試験体据付手順	9
3．試験ループの工学的成立性に関する検討	23
3.1　系統構成及び系統仕様	23
3.1.1　系統構成	23
3.1.2　系統除熱冷却性能	23
3.1.3　試験燃料破損時の放射脳低減対策、遮蔽対策	24
3.2　試験ループの合理化	26
3.2.1　Make up タンク方式	26
3.2.2　Make up タンク系統構成	29
3.2.3　Ｎａ漏洩対策	31
3.2.4　試験ループの全体配置	33
3.2.5　試験体側からの要求事項	35
3.3　試験体の予熱に関する検討	36

4．試験体の耐震性に関する検討 46
4.1　1次容器の振動固有値 46
4.2　試験体全体での耐震性 47

5．今後の課題 71

6．まとめ 72

謝　辞 74

参考文献 75

（添付－1）試験体の定格時熱収支 76
（添付－2）Make upタンク内ナトリウム温度変化計算 79
（添付－3）試験体からの放散熱量 83
（添付－4）試験体及びループの圧損（EMP必要揚程） 87
（添付－5）主要機器構造図 92

図表リスト

表２－１　試験体切り離し構造別比較表

表３－１　Make upタンク諸方式の比較表
表３－２　循環ループ方式とMake upタンク方式の比較表

表４－１　梁の固有振動数を算出するパラメータ
表４－２　梁の固有振動数を算出するパラメータ a_n
表４－３　梁の固有振動数の解析結果
表４－４　一次、二次及び三次容器の寸法
表４－５　FEM 解析結果（CASE １～CASE ３）
表４－６　FEM 解析結果（CASE ４～CASE ８）
表４－７　FEM 解析結果（CASE ９～CASE 12）

図２－１　方式 A（1 次容器一体型）試験体Ｎａ配管着脱方法
；グレイロック
図２－２　方式 A（1 次容器一体型）試験体概念図
図２－３　方式 B（1 次容器切り離し型）試験体概念図
図２－４　方式 C（仕切管上下切り離し型）試験体概念図
図２－５　方式 D（燃料試験部切り離し型）試験体概念図
図２－６　方式 D 試験体構造図
図２－７　接続管取扱機
図２－８　仕切管取扱機
図２－９　燃料試験部取扱機
図２-10-1 方式 D 試験体の据付手順（その１）
図２-10-2 方式 D 試験体の据付手順（その２）
図 2-10-3 方式 D 試験体の据付手順（その３）

図３－１　１次ナトリウム系統概略図（循環ループ方式）
図３－２　１次ナトリウム系統概略図（Make up タンク方式）
図３－３　Make up タンク方式構成検討図

図３－４　機器配置図（立面図）
図３－５　機器配置図（平面図）
図３－６　試験体からみた建物・原子炉等への要求事項

図４－１　一次容器固有振動数解析モデルの接点配置図
図４－２　一次容器固有振動数解析モデル（CASE ２）
図４－３　振れ止め構造のバネ定数と固有振動数の相関図
図４－４　モード図（CASE ４、バネ定数　100 kg/mm）
図４－５　モード図（CASE ５、バネ定数　1000 kg/mm）
図４－６　モード図（CASE ６、バネ定数　5000 kg/mm）
図４－７　モード図（CASE ７、バネ定数 10000 kg/mm）
図４－８　モード図（CASE ８、バネ定数 1E+8 kg/mm）
図４－９　振れ止め構造形状概念図
図４－10　振れ止め構造の解析モデル図
図４－11　CASE ９の中央断面の幾何特性図
図４－12　CASE10 の中央断面の幾何特性図
図４－13　CASE11 の中央断面の幾何特性図
図４－14　CASE12 の中央断面の幾何特性図
図４－15　CASE ９の変形図
図４－16　CASE10 の変形図
図４－17　CASE11 の変形図
図４－18　CASE12 の変形図

1．背景と目的

動力炉・核燃料開発事業団殿においては、高速炉を対象にした広範囲の炉内安全性試験を目的として、高速炉安全性試験炉計画（SERAPH 計画）の検討が進められている。この計画においては、試験炉はもとより試験体及び関連設備も重要視されており、その概念構築が急がれている。

このために、平成６年度にはSERAPH 炉内試験体の構造概念の調査・検討が実施された。この調査・検討ではナトリウムループ内蔵型の試験体の概念検討を行うと共に、圧力荷重（圧力パルス）に対する成立性が確認された。平成７年度には代表的３種類の試験体（ループ内臓型）について炉内試験体の熱収支計算を行い、炉内試験体系の成立性が確認された。[(1),(2)]

試験体ループのもう一つの形式概念に、炉内には試験体のみ設置しナトリウムループは炉外に設置する概念がある。内臓ループ方式は１次系のナトリウムの試験体内への格納性に優れているが、内蔵型であるがゆえの制約条件も無視できない。１次系ナトリウムの試験体内への格納性を犠牲にしても、試験体の構造上の柔軟性あるいは廃棄物の低減化、試験体取扱いの容易性等の観点から、炉外ナトリウムループ試験体の切り離し構造概念を広範囲に検討することとした。併せて試験体構造の代表例について据付手順を考え必要な取扱い機器の概略構造の検討も行う。[(3)]

外付け試験ナトリウムループに関しては工学的成立性の観点から、系統構成、系統仕様及び除熱性能等の検討を実施し、合理的な試験ループの構成、配置等の検討を行うものとした。

試験体の工学的成立性の要件の一つに構造強度がある。中でも、本試験体の様に細径長尺の構造物にとっては耐震強度が大きな問題となる。この耐震性の目安を得るべく、試験孔の内部に設置された体系化での振動特性に関して検討を行うものとした。

2．試験体切り離し構造に関する検討

本章では試験体の切り離し構造、即ち試験毎に交換消費する部分をどの範囲にし、そのためにはどのような構造であらねばならないかについて検討を実施した。試験毎の交換範囲を最少化することによってホットセル内での試験体の解体等の作業容易性が図られ、不要な放射性廃棄物量の低減化も果たされ、試験体の製作も含めて総合的に経済的、合理的な試験を可能と出来る。また、試験体のコンパクト化は、運用上の利得だけでなく、炉上部の必要スペース（試験体挿入、抜き出しスペース）減少で建物高さの抑制等設備建設上でも大きいメリットがある。

試験体の基本的構造概念は以下の２点としている。

①試験体に共通の構造要素として、燃料破損時の一次バウンダリーに対する衝撃力緩和の観点から試験体内部にナトリウム自由液面とカバーガス空間を設定する。液面制御は、カバーガス圧力制御によるものとする。

②試験体を挿入すべき試験孔との寸法取合いを考慮し、試験体下方の寸法は１次容器：φ 224× t4 ／２次容器：φ 270×t3 ／外容器：φ 300×t5 とし、上方は外容器径をφ 450 に抑える。

試験体の切り離し構造に伴う試験体の挿入、引き抜き等の取扱いに必要な機器の検討と取扱い手順についても検討を行った。

2.1 試験体構造の具体化

本節では大きくは以下の４種類（方式A、B、C及びD）の試験体切り離し方式について、その構造の具体化を行った。

方式A：１次容器一体型で、１次容器頂部をナトリウム配管等が貫通している。頂部の貫通配管等を切断して、１次容器全体を引き抜く。

方式B：１次容器切り離し型で、１次容器は試験体引き抜き時に炉内の２容器内に残されたままとなる。ナトリウム配管等は１次容器に接続され、切断の必要はない。先行炉の CABRI／SCARABEE の方式。

方式C：方式Bの試験体を軸長方向で約２分割し、コンパクト化を図った方式。

方式D：方式Cの試験体のうち仕切管と試験部燃料を切り離し可能な構造とし、仕切管を繰り返し使用可能にした方式。

2.1.1 切り離し方式の構造概念と特徴

以下にそれぞれの方式の構造概念と特徴を述べる。

（1）方式Ａ：１次容器一体型試験体

概念図を図２－２に示す。これは２次容器までを常設方式とし、試験燃料等を予め組込んだ１次容器までの試験体を上部から挿入設置するものである。この方式の得失は次の様である。

メリット；

①別途工場にて組立てられ、完成品で持ち込まれる為に、試験体としての製作 精度等が高いことが期待できる。

②試験体として１次ナトリウムバウンダリーの開放部が最少ですむ（ナトリウム出入り口配管のみ）。従って試験体取扱い機等に１次ナトリウムの滴下汚染対策等が不必要である。（取扱い機に密閉構造が要求されず、遮蔽機能だけを考慮すれば良い可能性あり。ドアバルブ等も不要か。）

③１次容器の構造はシンプルで構造健全性の担保度が高い。

④試験体の挿入性は容易である。

デメリット；

⑤１次容器を含めて、消耗部が大きい。試験体は高コストであり、かつ廃棄物が大幅に増大する。

②外付きループとナトリウム配管等の脱着が必要であり、この接続部分の信頼性、取扱い性についての難しさがある。

③試験体組立て後の試験計装等の補修、手直しは難しい。

④試験体取扱い機の長さは12～3m におよび炉上部にはこの取扱い機を吊り上げハンドリング出来る揚重機を含んだスペースが必要である。

（2）方式Ｂ：１次容器切り離し型試験体

概念図を図２－３に示す。これは１次容器までを常設方式とし、試験燃料等を予め組込んだ仕切管までの試験体を１次容器上部を開放して挿入設置するものである。この方式の得失は以下のようである。

メリット；

①方式Ａに比較して低コストで、かつ廃棄物の低減（１次容器分）が出来る。

②ループと１次容器のナトリウム配管等は常設化でき、配管接続部の健全性の懸念（漏洩）は払拭できる。

③方式Ａと同様に試験部計装は一体組込みでき、試験体内でのケーブル等の接続は無い為、試験体の電気的信頼性は高い。

④１次容器の外側への付属装置（予熱ヒータ等）の取付等に裕度がある。

デメリット；

①試験体の挿入、取り外し時に１次ナトリウムバウンダリーである１次容器の上部を開放しなければならない。このために密閉機能を備えた取扱い機等が必要となる。

②試験体の取り外し時の交換機には、１次ナトリウムの滴下汚染対策等が必要で取扱い機の構造、取扱いを難しくする。

③１次容器と仕切管の間で１次ナトリウムのシールおよびカバーガスのシール構造が必要で、１次容器と仕切管の取合い構造を複雑にしている。

④上記３）項の関連で、試験体の挿入、取り外し作業は相当慎重を要す。

⑤試験体組立て後の試験計装等の補修、手直しは難しい。

⑥試験体取扱い機の高さは12～3m におよび炉上部にはこの取扱い機を吊り上げハンドリング出来る揚重機を含んだスペースが必要である。

（３）方式Ｃ：仕切管上下切り離し型試験体

概念図を図２－４に示す。これは１次容器までを常設方式とし、試験燃料等を予め組込んだ仕切管と上部の接続管を分割し、取扱い長さを軽減した試験体を１次容器上部を開放して挿入設置するものである。この方式の得失は以下のようである。

メリット；

①方式Ｂと比較して更に廃棄物の低減（接続管分）が出来る。

②ループと１次容器のナトリウム配管は常設で良く、配管接続部の健全性の懸念は払拭できる。

③取扱い機の高さは方式ＡおよびＢの一体型に比べ大幅に低減できる（約9m）。このため建物側の合理化が期待できる。

④１次容器の外側への付属装置（予熱ヒータ等）の取付等に裕度がある。

デメリット；

①試験体の挿入、取り外し時にナトリウムバウンダリーである１次容器の上部を開放しなければならない。このために密閉機能を備えた取扱い機等が必要となる。

②試験体の取り外し時の取扱い機には、１次ナトリウムの滴下汚染対策等が必要で取扱い機の構造、取扱いを難しくする。

③１次容器と仕切管の間で１次ナトリウムのシールおよびカバーガスのシール構造が必要で、１次容器と仕切管の取合い構造を複雑にしている。

④上記３）項の関連で、試験体の挿入、取り外し作業は相当慎重を要す。

⑤仕切管と接続管の着脱操作が必要で、試験体の挿入、取り外し操作が複雑かつ時間を要すものとなる。かつ、仕切管が短くなる為に、仕切管取扱い時の被爆線量の問題が大きくなる。

⑥上記の着脱操作の為の特別な機器（含む遮蔽構造）が必要となる。

（4）方式Ｄ：燃料試験部切り離し型試験体

概念図を図２－５に示す。これは上述の方式Ｃ：仕切管上下切り離し型試験体の仕切管構造の中に一体組込みされている燃料試験部を分離構造とし、１次容器の中に予め組込んだ仕切管に、分離した燃料試験部を後から挿入設置、及び試験後は仕切管の引き抜きに先んじて引き抜き撤去を可能とするものである。この方式の 得失は以下のようである。

メリット；

①方式Ｃと比較して更に廃棄物の低減（仕切管分）が出来る。方式Ａと比較すれば大幅低減（１次容器分、接続管分及び仕切管）となる。

②ループと１次容器のナトリウム配管は常設で良く、配管接続部の健全性の懸念（漏洩）は払拭できる。

③取扱い機の高さは方式ＡおよびＢの一体型に比べ大幅に低減できる（約9m）。このため建物側の合理化が期待できる。

④１次容器の外側への付属装置（予熱ヒータ等）の取付等に裕度がある。

デメリット；

①試験体の挿入、取り外し時にナトリウムバウンダリーである１次容器の上部を開放しなければならない。このために密閉機能を備えた取扱い機

表２－１　試験体切り離し構造別比較表

	方式Ａ（1次容器一体型試験体）	方式Ｂ（仕切管一体型試験体）	方式Ｃ（分離仕切管型試験体 1）	方式Ｄ（分離仕切管型試験体 2）
交換範囲	一次容器までが工場組立のため、製作精度が高い。	仕切管までが工場組立となる。 常設分（一次容器）との取合部の高精度化が要求される。	仕切管下部までが工場組立となる。 常設分（一次容器）との取合部の高精度化が要求される。	試験部(六角管)までが工場組立となる。 一次容器との取合部となる仕切管も半常設（必要に応じ交換）となる。
一次容器構造	一次容器の構造は、シンプルで構造健全性が高い。 Na・ガス配管、計装線等全てが上蓋部を貫通するため、余裕がない。	一次容器の構造は、供給ラインの出入口があり複雑となる。 上蓋部の貫通は、合理化できる。	← 同左 ← 同左	← 同左 ← 同左
Na バウンダリーの開放	試験体切り離し時のNaバウンダリー開放部が、最小であるため健固性は高い。	試験体切り離し時に一次容器の上部を開放するため、開放部は広くなる。	← 同左	← 同左
Na 供給ライン	試験体切り離し時、Na 供給ラインの着脱が必要である。	Na 供給ラインは一次容器へ常設されるため、配管着脱部は不要。	← 同左	← 同左
計装品の取付（ヒータ含む）	一次容器外側へのヒータ取付が困難である。また、挿入時にも注意を要する。（交換部品） 計装線の着脱は、試験体切り離し前に行う。	一次容器外側へのヒータ取付が容易である。（常設） 計装線の着脱は、試験体切り離し前に行う。	← 同左 計装線の着脱は、試験体切り離し作業途中にも行う。	← 同左 ← 同左
廃棄物	消耗部が大きくなり、廃棄物は増大する。	一次容器分の廃棄物の低減ができる。	一次容器および接続管分の廃棄物の低減ができる。	一次容器、接続管および仕切管分の廃棄物の低減ができる。
切り離し時のハンドリング	脱着部の全長は長くなるが、構造はシンプルであるため、作業性は良い。	脱着部の全長は長くなり（方式Ａとほぼ同じ）、また構造も複雑になるため挿入性を悪くする。作業は相当慎重を要する。	脱着部の全長は短くなり、挿入性は若干改善されると期待できる。 脱着部が分割されるため、工程が増え、その作業も相当慎重を要する。	← 同左 脱着部は試験部のみとなるため、工程が増え、その作業も相当慎重を要する。
交換機	大型 Na 滴下汚染対策は最小限で可。 密閉構造は要求されない。ただし、遮蔽機能は考慮する必要がある。	大型 Na 滴下汚染対策が必要。 密閉構造が要求される。遮蔽機能も考慮する必要がある。	小型 Na 滴下汚染対策が必要。各工程毎に専用交換機が必要となる。 ← 同左	小型 ← 同左 ← 同左
評価　製作性	A	B	B	C
評価　作業性	A	B	C	C
評価　廃棄物の規模	C	B	A	A
評価　建屋へのｲﾝﾊﾟｸﾄ	C	C	A	A
評価　経済性	C	B	A	A
評価　**総合評価**	**C**	**B**	**A**	**A**

注）　Ａ：有利、Ｂ：普通、Ｃ：不利

等が必要となる。

②試験体の取り外し時の取扱い機には、１次ナトリウムの滴下汚染対策等が必要で取扱い機の構造、取扱いを難しくする。

③１次容器と仕切管の間で１次ナトリウムのシールおよびカバーガスのシール構造が必要で、１次容器と仕切管の取合い構造を複雑にしている。

④上記３）項の関連で、試験体の挿入、取り外し作業は相当慎重を要す。

⑤燃料試験部と仕切管および仕切管と接続管の着脱操作が必要で、試験体の挿入、取り外し操作が複雑かつ時間を要すものとなる。かつ、燃料試験部および仕切管が短くなる為に、取り扱い時の被爆線量の問題が大きくなる。方式Ｃと比較して作業工程は増加する分だけ厳しい。

以上の方式Ａ～Ｄの構造概念の中から方式Ｄの燃料試験部切り離し型試験体を選んで、さらに構造の具体化を展開し図２－６に縮尺１／10の構造図として示した。

2.1.2 各方式の特徴比較

前節の各方式の特徴の議論を簡単にまとめて表２－１に比較表として示す。試験体の製作性、試験体取扱い作業性、廃棄物の規模、試験体の形状に起因する建物へのインパクト及び試験体の経済性（製作費用、試験後の解体、処理費用等）についての評価を参考に実施した。その結果は、方式ＣとＤがＡランク、ただし若干方式Ｃの方が製作性で優位にある。方式Ａは廃棄物の大きさ、コストの面で不利益度が大きく総合的にＣランクとなった。方式Ｂは全体的に堅実なものであるが特徴の無い平均的な評価としてＢにランクされた。

2.2 試験体取扱い設備に関する検討

2.2.1 必要な取扱い設備

(1) 方式Ａの試験体の場合

試験体へのナトリウム、不活性ガスの出入りのための接続配管を脱着出来る継手構造が必要である。特にナトリウム配管の場合、比較的細い配管については、例えばナトリウムサンプリング配管（口径２０Ａ程度）等、スェージロック継手の実績があるが、６０Ａ（２Ｂ）を超える様な口径の

ものでは国内ではあまり実例は見当たらない。スェージロックでは口径６０Ａまでは製作可能である。

温度変化による熱的繰り返し荷重や耐震荷重等の厳しい負荷荷重にたいしても、比較的健全性が高いと米国等で評価されているグレイロックが採用の最有力候補と考えられる。図２－１にその使用概念図を示す。

ナトリウム配管の脱着に際しては、特別な考慮が必要である。ナトリウムに接する雰囲気の不活性化という観点からは、図２－１のようなバッギング方式を考える必要がある。特に１次ナトリウム取扱いということで重装備を要求される可能性は大で、この場合にはより気密性高いのポータブルなグローブボックスが必要となる。

また、試験体の取扱いでは試験後の引き抜き時に部分的な遮蔽構造が必要になると考えられるが、密閉機能まで要求されるものではなく、かなり簡便な構造のもので対処し得るものと考えられる。挿入、取り外しに必要な揚重装置についても、一般的に原子炉建物内に設置の期待されるクレーン等で可能と考えられる。

(2) 方式Ｂの試験体の場合

試験体は１次容器内の１次ナトリウム中に置かれるため、取出し時は１次ナトリウムのドレン後に行われるが、ナトリウムの付着はあるために取出し時の取扱い機は密閉機能およびナトリウム滴下対策機能が必要である。

取扱い作業（準備段階も含めて）の簡便化を考慮すると、挿入時の新試験体用取扱い機と照射済試験体用取扱い機の２種類が必要と考えられる。

試験体を設置しない間は，１次容器はプラグされ不活性雰囲気に置換されている必要があり、このプラグ取扱い機が必要となる。

(3) 方式Ｃの試験体の場合

仕切管（試験体）用取扱い機と接続管用取扱い機が必要と考えられる。試験後仕切管用は遮蔽機能が必要となる。新仕切管と試験後仕切管は合理化のために、同一取扱い機で扱うことは可能である。。それぞれの取扱い機は方式Ｂのものに比較して高さはかなり低減（４～５ m）されたものとなる。本方式の取扱い機の概念は次項の方式Ｄのものとほぼ同様なもの

となる。本方式の接続管取扱い機は図２－７と同様、仕切管取扱い機は図２－８に図２－９(燃料試験部取扱い機)の遮蔽を反映した構造となる。

本方式で特徴となるのは、試験体と接続管を脱着するための操作工程が付加され、そのための特殊機器（グロ-ブを有する試験孔上部接続胴等）が必要となる。この概念については図２－１０の取扱い手順図を参照のこと。

(3) 方式Ｄの試験体の場合

本方式では、上述の方式Ｃの場合に分離された燃料試験部の取扱いが付加されたものとなる。仕切管の放射化の程度にもよるが、一応ここでは遮蔽機能は燃料試験部取扱い機のみとした。本方式の取扱い機の概念を図２－７、８、９に示す。

2.2.2 試験体据付手順

本節では、試験体据付手順としてもっともステップが多い方式Ｄの試験体について、その据付手順を検討した。

図２－１０－１、２及び３に方式Ｄ試験体据付手順（その１）、(その 2)、(その３)として図示する。以下に据付手順の順を追って説明を加える。

①試験休止状態。１次容器は上部でプラグされ、内部はｱﾙｺﾞﾝｶﾞｽ置換された状態にある。

②作業用のグローブが設けられている上部ドアバルブ構造のブローブボックス（以下、接続胴と称す）を試験体外容器(含む２次容器)上部フランジに接続する。

プラグ取扱い機が搬入されてきて、接続胴上部フランジと接続する。接続胴及びプラグ取扱い機それぞれのドアバルブ①、②が開放され、内部雰囲気をアルゴンガス置換する。置換は試験炉上部に真空引きライン及びアルゴンガスラインが常設され、取扱い機の接続口にその都度接続して使用する。

ガス置換後、プラグ取扱い機内臓の吊り上げ治具を降ろし、接続胴部のグローブを使用してプラグに接続、プラグの固定を解いて吊り上げる。

③プラグ取扱い機内にプラグを収納し、ドアバルブ①及び②を閉じる。

④プラグ取扱い機を撤去、搬出する。接続胴のドアバルブ①は閉じられている。

⑤仕切管を収納した仕切管取扱い機が搬入されてきて、接続胴に設置される。仕切管取扱い機内の雰囲気がアルゴンガス置換されていることを確認（必要なら置換操作実施）する。

⑥ドアバルブを開放し仕切管を１次容器の上部に挿入し、上部で仕切管を仮固定する。釣り具を外し、仕切管取扱い機の中に巻き上げ収納する。

⑦接続胴及び取扱い機両方のドアバルブを閉じ、取扱い機を取り外し撤去、搬出する。

⑧燃料試験部を内蔵した試験部取扱い機が搬入され、接続胴上部に接続される。試験部取扱い機内の雰囲気がアルゴンガスに置換されていることを確認する。

⑨ドアバルブを開放し燃料試験部を慎重に仕切管内に吊り降ろし、所定の位置に調整し設定する。燃料試験部には多数の計装線が付属しており、取扱いは慎重に行う。設定完了後、釣り具を外し、燃料試験部取扱い機の中に巻き上げ収納する。

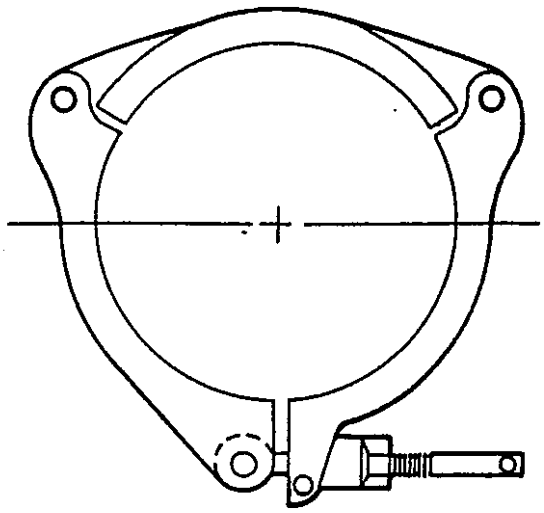
⑩両方のドアバルブを閉じ、取扱い機を取り外し撤去、搬出する。

⑪接続管を内蔵した接続管取扱い機が搬入され、接続胴上部に接続する。接続管取扱い機内の雰囲気がアルゴンガスに置換されていることを確認する。

⑫接続胴及び取扱い機のドアバルブを開放し接続管を徐々に吊り降ろし、燃料試験部が挿入された仕切管と接続する。この時、計装接続端子の接続も実施する。

⑬接続完了後、仮固定治具を取り外し１次容器内に吊り降ろして行く。この過程はナトリウムのシール部等を内部構造物が通過して行くので、慎重の上にも慎重を期して行う必要がある。所定の位置への挿入設置が確認されたら、吊り治具を取り外し取扱い機の中に巻き上げ収納する。

⑭両方のドアバルブを閉じ、取扱い機を撤去、搬出し、引き続いて接続胴を撤去、搬出する。挿入した試験体の接続管上部で計装線の接続作業等を行い、上部押さえ治具にて固定する。



A-A

QUICK DISCONNECT
CLAMP FOR
SODIUM CONNECTOR

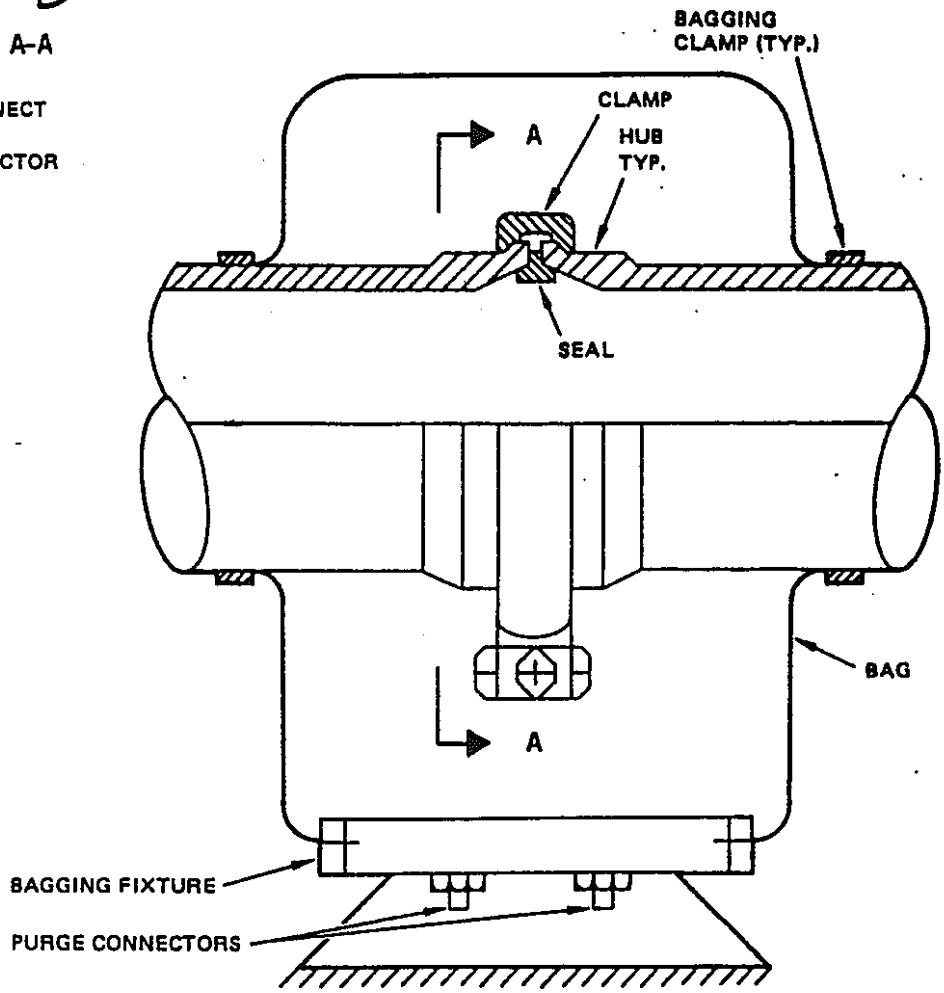


図2－1 方式A試験体Na配管着脱方法 ； グレイロック

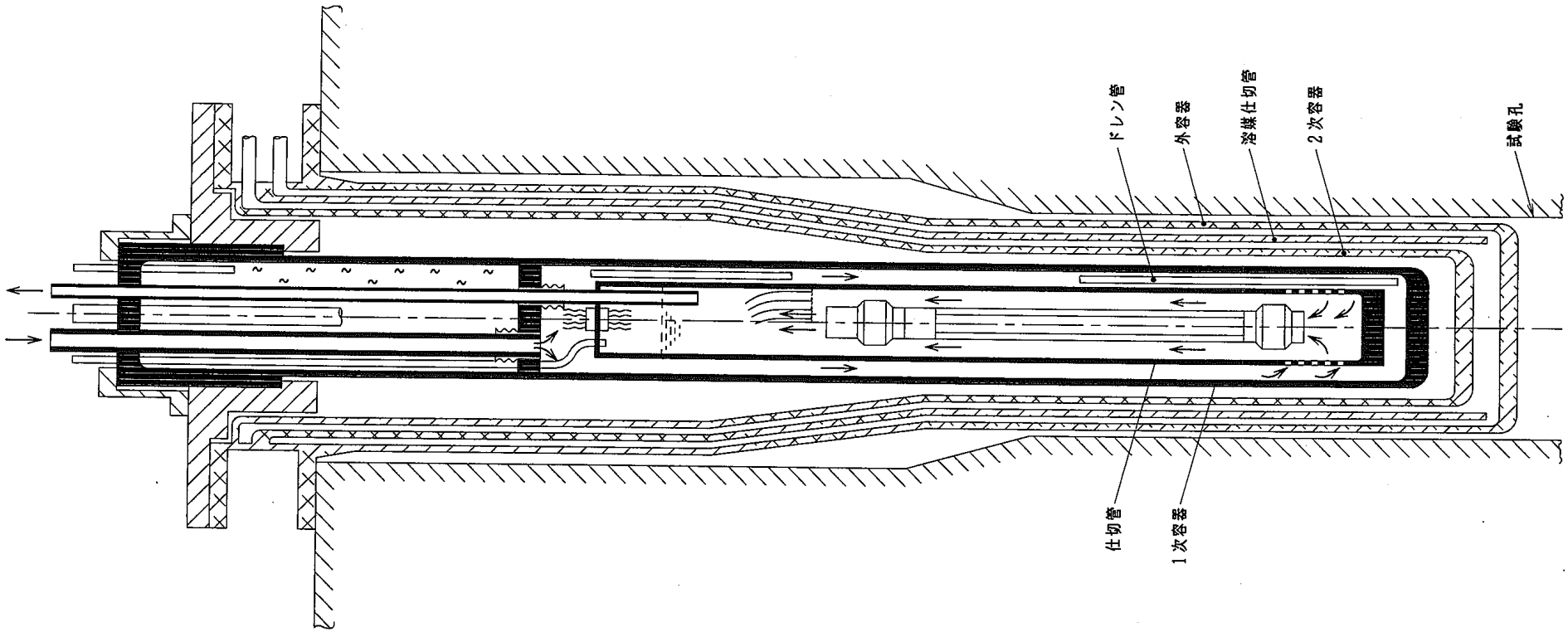


図2－2　方式　A　試験体概念
（1次容器一体型）

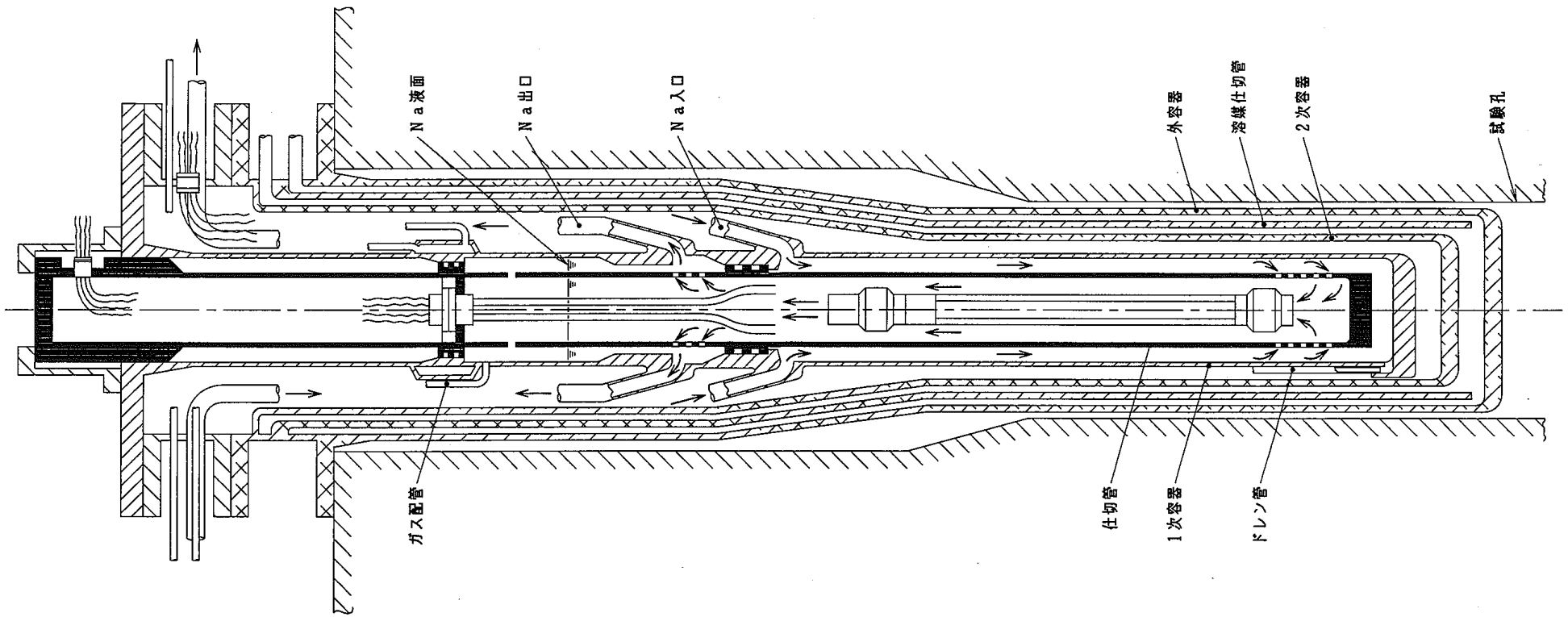


図2－3　方式　B　試験体概念
（1次容器切離し型）

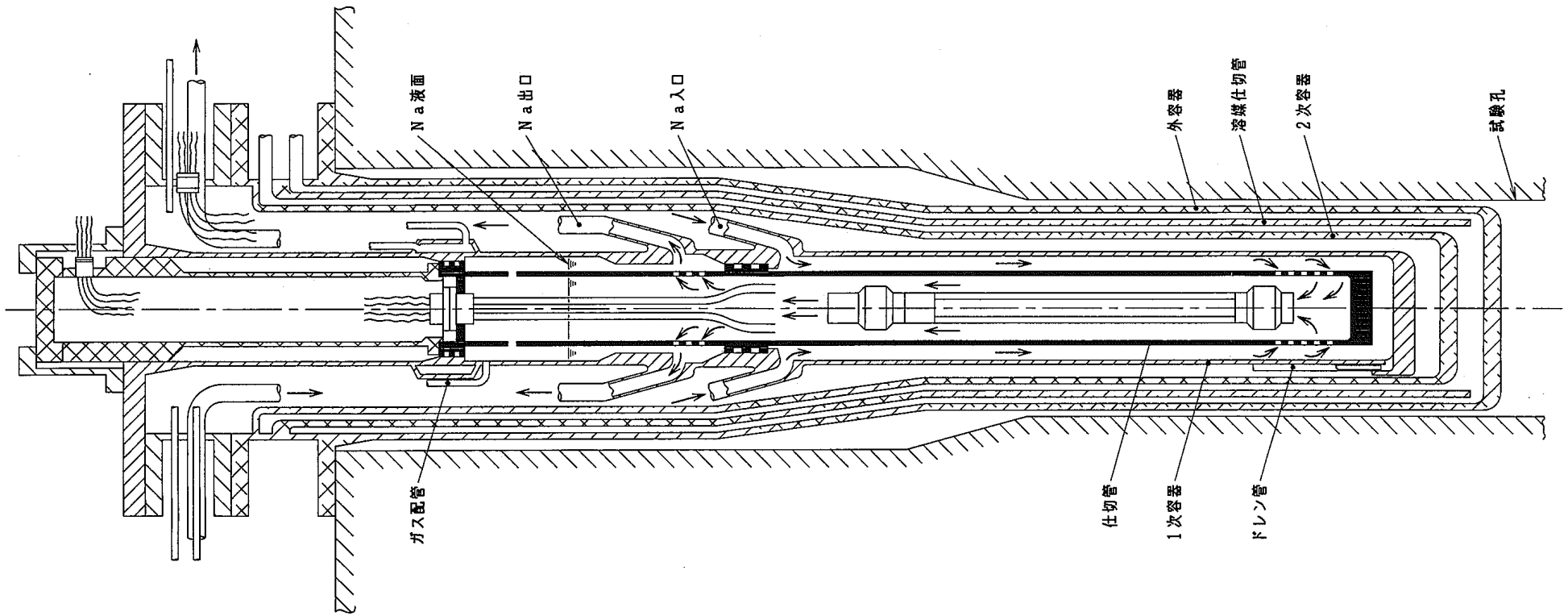


図2－4　方式　C　試験体概念
（仕切管上下切離し型）

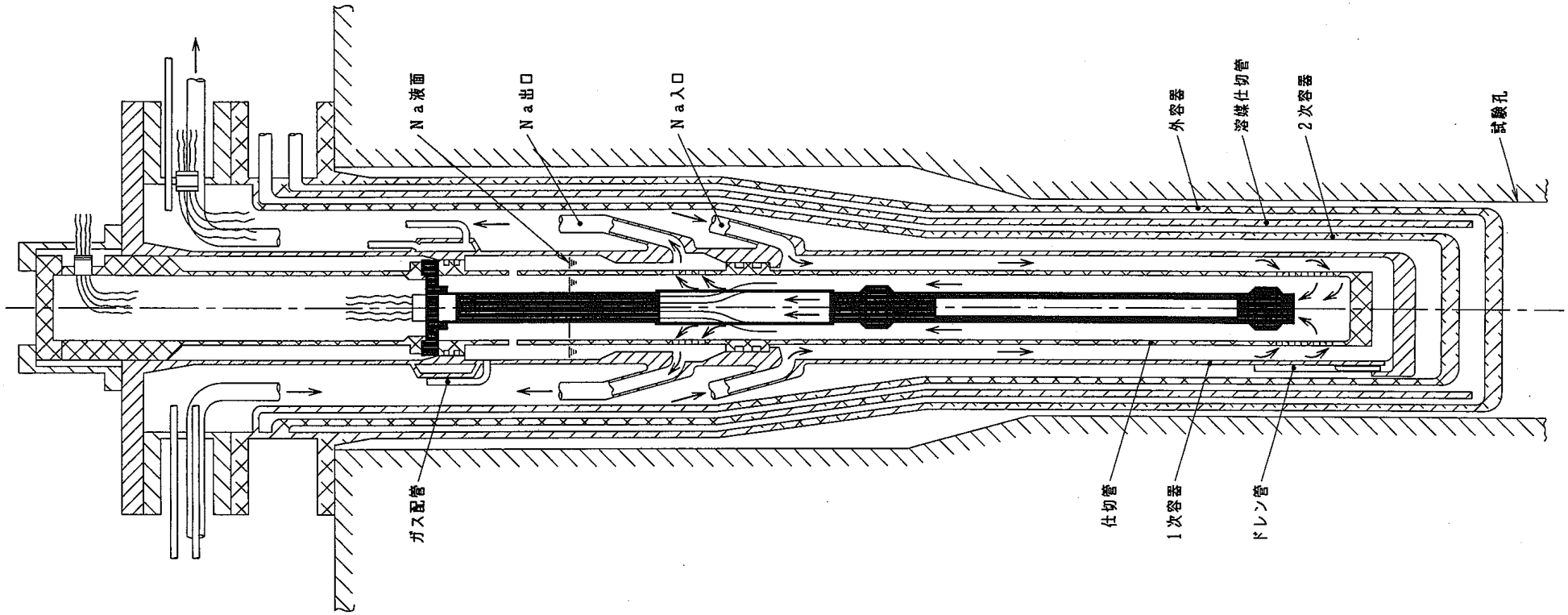
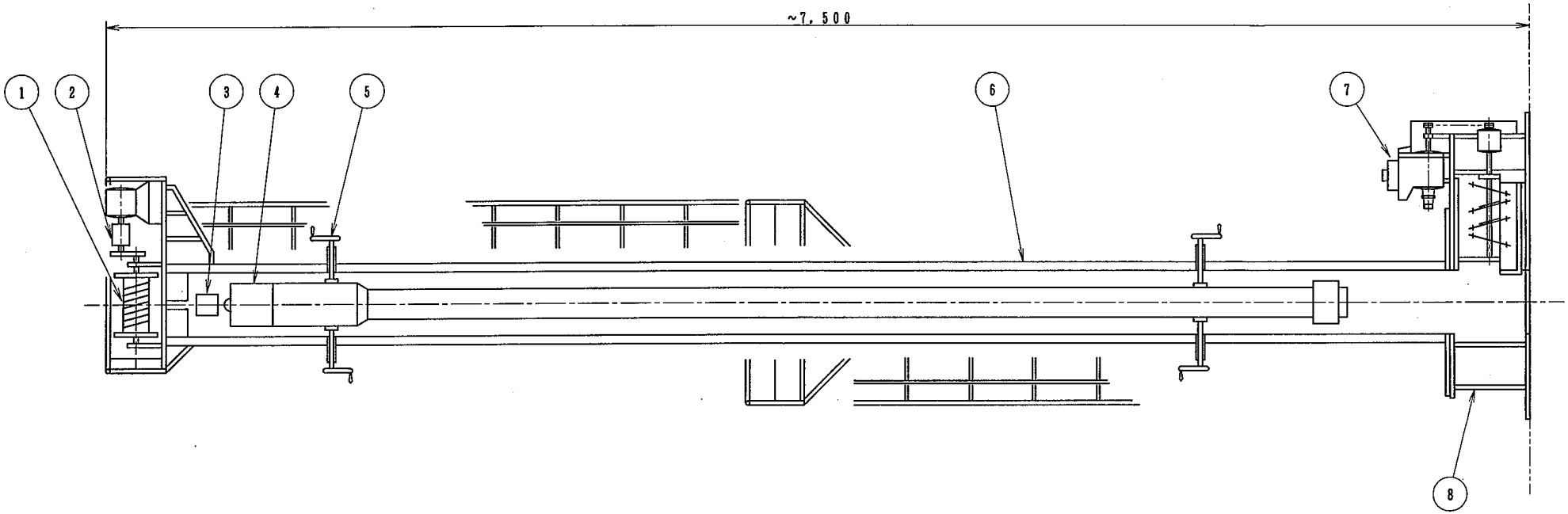


図2－5　方式　D　試験体概念
（燃料試験部切離し型）

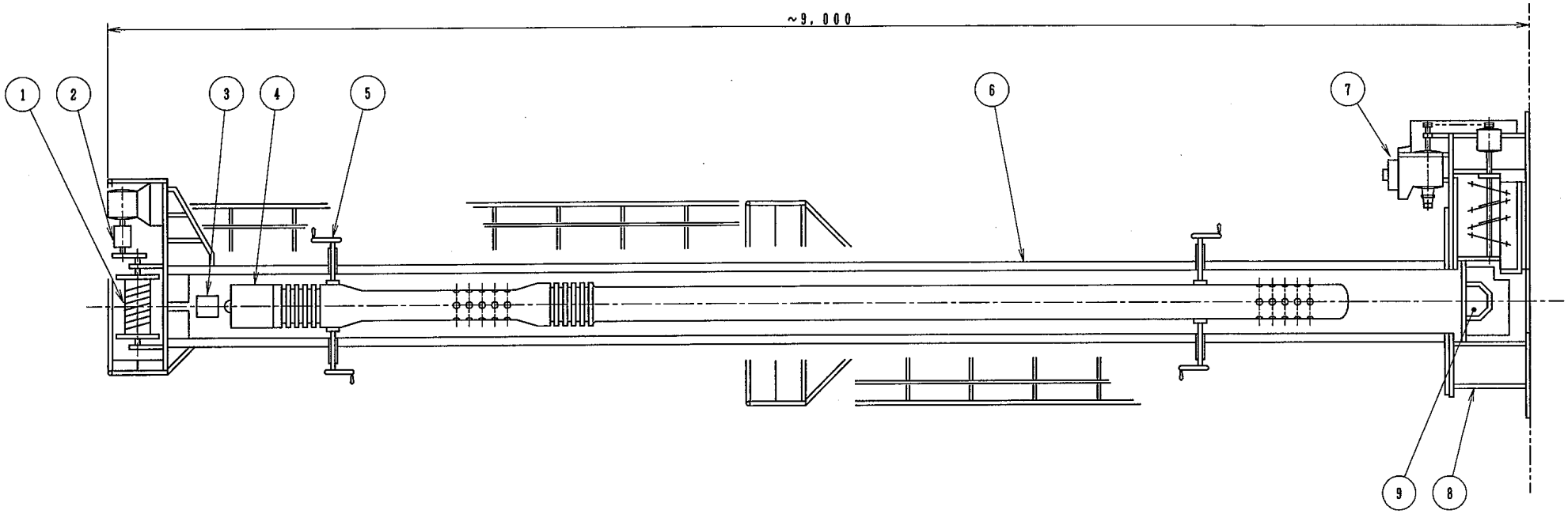
この頁はPDF化されていません。

内容の閲覧が必要な場合は、技術資料管理担当箇所で原本冊子を参照して下さい。



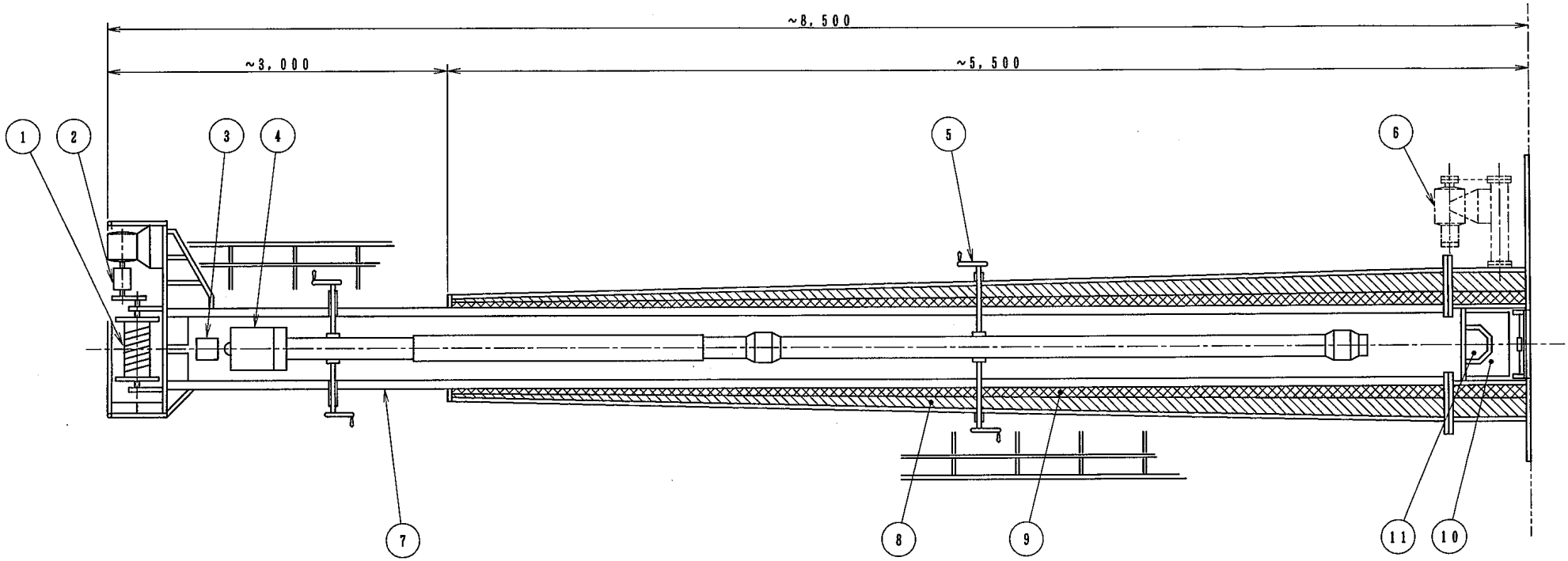
品番	名称	材料
8	ドアバルブ	SUS304、他
7	ドアバルブ駆動機構	炭素鋼、他
6	容器	SUS304
5	支持機構	SUS304、他
4	グリッパー機構	
3	ロードセル	
2	位置検出機構	
1	上下動駆動機構	炭素鋼、他

図2－7　接続管取扱機



品番	名称	材料
9	Na受皿	SUS304
8	ドアバルブ	SUS304、他
7	ドアバルブ駆動機構	炭素鋼、他
6	容器	SUS304
5	支持機構	SUS304、他
4	グリッパー機構	
3	ロードセル	
2	位置検出機構	
1	上下動駆動機構	炭素鋼、他

図2－8　仕切管取扱機



品番	名称	材料
11	Na受皿	SUS304
10	ドアバルブ	SUS304、鉛、他
9	γ線遮へい層	鉛
8	中性子遮へい層	ポリエチレン
7	容器	SUS304、他
6	ドアバルブ駆動機構	炭素鋼、他
5	支持機構	SUS304、他
4	グリッパー機構	
3	ロードセル	
2	位置検出機構	
1	上下動駆動機構	炭素鋼、他

図2－9　燃料試験部取扱機

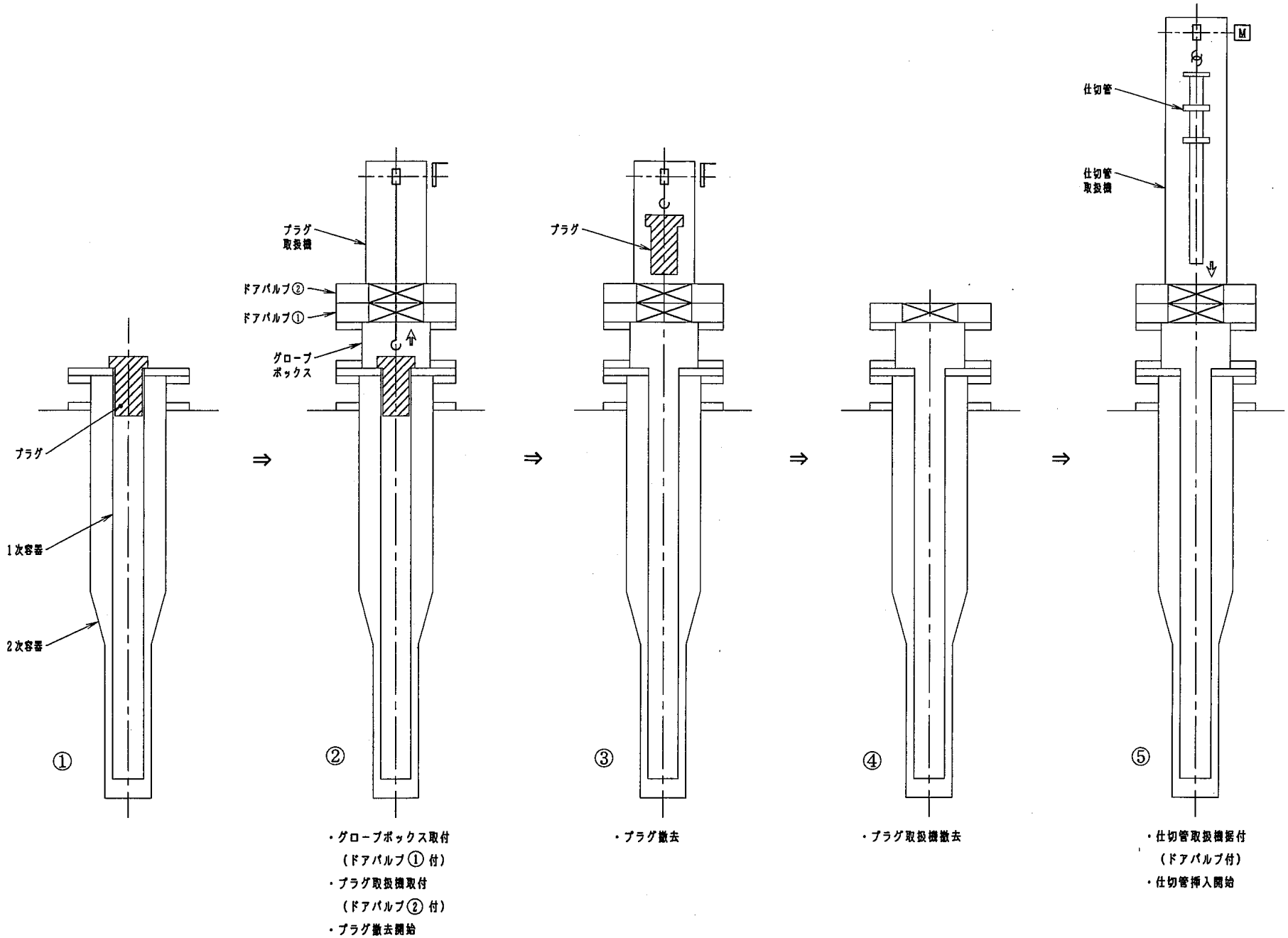


図2－10－1　方式D試験体の据付手順（その1）

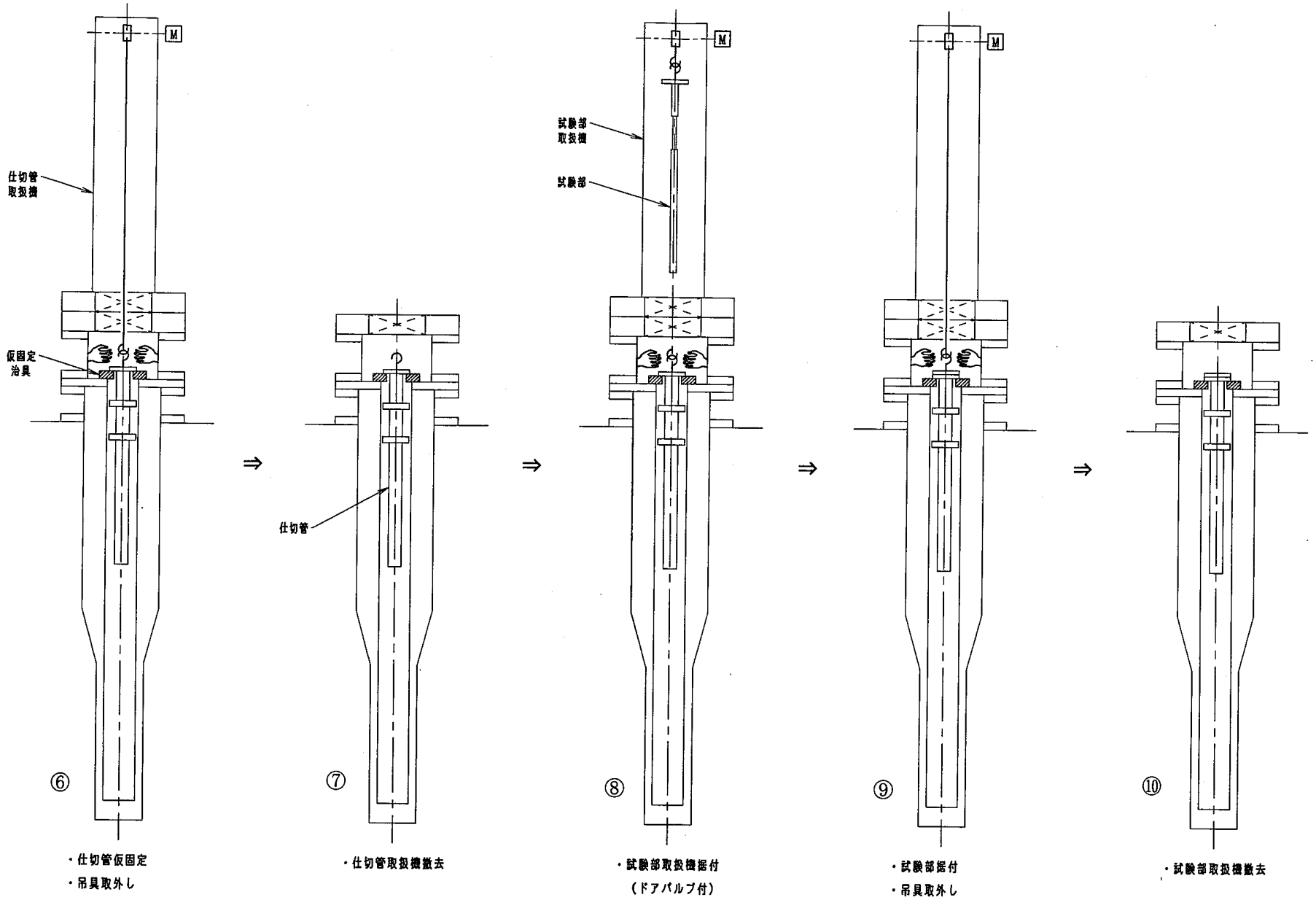


図2－10－2　方式D試験体の据付手順（その2）

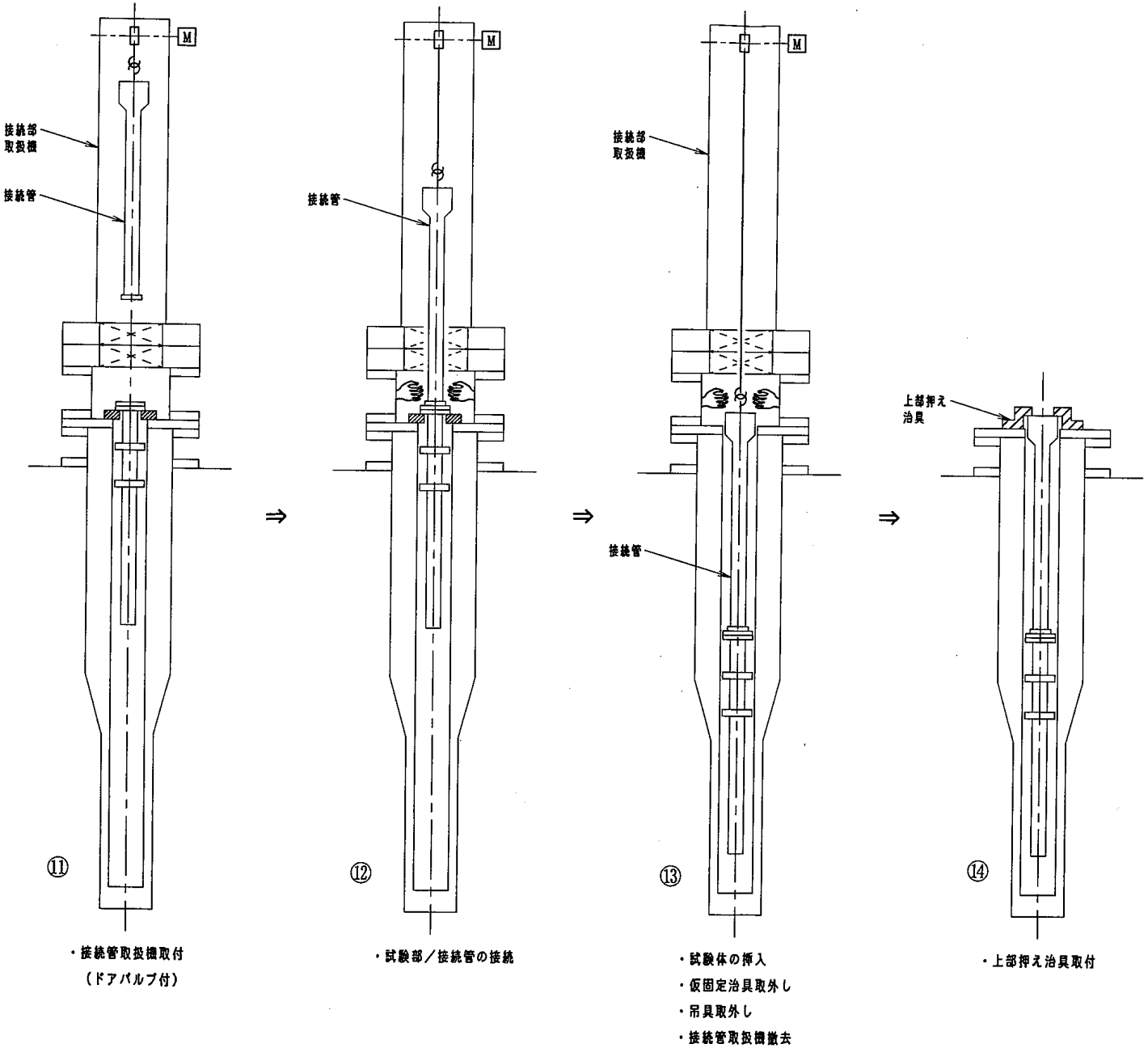


図2－10－3　方式D試験体の据付手順（その3）

3．試験ループの工学的成立性に関する検討

本章では試験体に所定の温度及び流量条件でナトリウムを供給する外付けのナトリウムループの工学的成立性について検討する。検討に当たっては、平成７年度実施の契約業務報告書　PNC　PJ9055　96-003「炉内試験体の熱収支計算と成立性調査」（以下、“平成７年度検討”と略称する。）の検討結果を参照するものとする。

3.1 系統構成及び系統仕様

本節では外付けナトリウムループとして、試験体の発熱量を除熱冷却し、温度制御機能を有する閉循環ループについて検討する。

3.1.1 系統構成

１次ナトリウム系統構成の概略を図３－１に示す。構成機器は膨張タンク、熱交換器、ダンプタンク、電磁ポンプ、電磁流量計、純化ユニット、プラギン計、フィルター、ろ過回収タンク、配管、弁及び計装品等である。純化ユニットは試験体の切り離しを前提とすれば、運用の中で酸素、水素等の不純物混入は避けられないことから、必要と判断される。

フィルター及びろ過回収タンクは試験体燃料の破損等に対処し、ループの汚染度を軽減する為に設けている。

熱交換器については、形式を決定する上でいろいろと議論が必要となる。簡便性だけからいえば空気冷却方式があるが、１次系ナトリウムの冷却ということから万一の漏洩時の公衆被爆対策を考慮すると、いろいろと困難が生じてきそうである。ここでは２次ナトリウム冷却系を有する概念にとどめた。

膨張タンクについては、試験体から戻るナトリウム流を一度膨張タンクに受入、ミキシングの促進とループ内滞留時間を増やす構成とした。ダンプタンクは、ループの保守点検あるいは万一の漏洩事故時の緊急ドレン対応等に必要と判断した。

3.1.2 系統除熱冷却性能

“平成７年度検討”から代表３種類の試験体、①タイプⅠ(標準試験体ループ１）、②タイプⅠ(標準試験体ループ２）及び③タイプⅤ（定常保

持型プール試験体）の定格時熱収支を添付－１に示す。これによれば定格状態での最大熱負荷は２番目の標準試験体ループ２（６１ピン束）の場合であり、約２２００KWである。ナトリウム流量は試験部及びバイパス流量を併せて約1000 l／min、熱交換器の出口／入口温度は１次側で３６７℃／４９１℃、２次側で２２０℃／３８０℃である。試験上での過渡的な過出力状態例が“平成７年度検討”の中で報告されている。燃料チャンネルの出口のバイパス流との混合後の温度は定格時に比べ約１００℃上昇している。この場合の対数平均温度差は約４０％増加することになる。しかるに、熱交換器に至るまでの流路構成材の熱容量や流動上のミキシング効果を勘案すると、除熱冷却性能としては定格時熱負荷の約２０％増しの２６００KWで機能的には十分と判断できる。

本熱交換器の機能は循環して試験体に戻るナトリウムの温度を所定値に保持する事であるが、上述のとおり過渡的な変化を伴うのでその温度制御性ははなはだ困難なものとなる。定性的には１次側の温度変化に追随する為には２次側は流量制御を行う必要がある。

２次ナトリウムの最終除熱は一般的には空気冷却式熱交換器が選択される。しかしながら、３８０℃／２２０℃の温度条件で２６００KWの空冷熱交換器はかなり大きな形状寸法となる。

3.1.3 試験燃料破損時の放射能低減対策、遮蔽対策等

厳しい照射試験に伴い試験燃料破損がありえる。破損した場合には１次ナトリウム中に破損燃料粒子が混合し外付けループ側に持ち込まれループを汚染する。ナトリウムループは基本的にナトリウムドレン性を十分考慮して建設されるが、機器の構造上わずかながらナトリウムが残留する個所やコールドトラップのように本質的に不純物とともに器内に貯留する機能を有するものもある。従って、ループの内部に極力破損燃料粒子を持ち込まないことが重要である。そのために、試験体からループへの入口には破損燃料粒子をろ過できるフィルターを設置する。

ろ過精度については流量と許容圧損及び装置の大きさのバランスを考慮して決定して行く必要がある。ちなみにＣＡＢＲＩの場合は約４０μのろ過精度のフィルターを採用している様である。

フィルターは廃棄物の低減の観点から逆洗機能を持つ系統構成にすべき

である。逆洗時のナトリウムはろ過回収タンクに一時受入、ろ過物が沈殿後に上澄みナトリウムを系統に戻す運用とする。フィルター、ろ過回収タンクには建設初期から遮蔽を設けておくべきである。燃料破損の頻度が高い場合にはフィルターを通過した微細な破損燃料粒子が純化の際にコールドトラップに蓄積されて行くのでコールドトラップの遮蔽が必要になる可能性もある。その他の機器・配管類全て遮蔽を設けることは設備建設上で大きな障害－例えば耐震性の担保の困難性等－となるので、ループにナトリウムを充填し運転中は原則としてアクセスを禁止する等の運用面で遮蔽対策は合理化して行くべきである。。

１次ナトリウムに対するナトリウム漏洩対策が必要である。漏洩の検知機能の充実はもとより、万一の漏洩時の影響緩和の対策は真剣に検討しなければならない。本設備が建設に際しては、科学技術庁の許認可を必要とすることから、１次ナトリウムの格納性の担保と、燃焼抑制対策は避けられないと判断される。即ち、１次ナトリウム系に関しては「常陽」や「もんじゅ」と同等の窒素雰囲気の格納性のあるセルへの設置が必至の選択となろう。

3.2 試験ループの合理化

前節 3.1 では除熱冷却による温度制御機能を有するナトリウム循環ループについて検討を行った。その結果、定性的には温度制御がかなり困難であるという試験実施上での問題点、及びヒートシンクとしての大型な２次ナトリウム系空冷熱交換器が必要であり、１次系との分離等を考慮すると配置上の問題が大きいことが判明した。

本節では試験性の向上、及び配置の容易性等の観点から合理的な代替ループについて検討する。

3.2.1 Make up タンク方式

高速炉安全性試験炉での試験所用時間はせいぜい 10 分間程度である。この時間、ループに要求されている流量・温度のナトリウムを試験体に供給出来ることが必須要件である。このためには所定温度の必要なナトリウム量を保持したタンクと試験体を通過し温度的な影響を受けたナトリウムを受け入れるタンクを備える（分離タンク移送方式）ことで、流動ナトリウムの温度制御不要なループ構成が可能となる。さらに、合理化の観点から１基の Make up タンクの底部から供給し、上部に流動上の混合を抑制するように均一な低流速で戻す（タンク循環方式）系統構成も考えうる。この場合、上部に戻る高温のナトリウムの温度影響が熱拡散によってタンク出口に如何に影響してくるかが問題である。この場合、タンク形状は多少なりとも縦長の方が温度影響は遅れることになる。

“平成 7 年度検討”では６１ピン束の試験体流量を約１０００ｌ／min と設定しており、この場合１０分間の試験の為の必要最少ナトリウム容量は１０m^3である。余裕を見て、１５m^3のナトリウム容量で、タンク幾何容積を２０m^3と仮定して両方式について比較検討する。

（１）分離タンク移送方式

Ｍ／Ｔからダンプタンク（Ｄ／Ｔ）へ一方通行的に流す方法。

Ｍ／Ｔ： 概略寸法 φ 3.0m×3.0m 縦置き …… １基

Ｄ／Ｔ： 概略寸法 φ 3.0m×3.0m 縦置き …… １基

（２）タンク循環方式

Ｍ／ＴからＭ／ＴまたはＭ／Ｔと連通したＤ／Ｔへ戻し、Na を供

給系で循環させる方法。タンク循環方式は、タンクの形状・基数の違いにより次のような方法が考えられる。

①タンク内部構造に工夫を加えた縦置きタンク式

M／T： 概略寸法 φ 3.0m×3.0m 縦置き …… 1基

② 縦長タンク式

M／T： 概略寸法 φ 2.5m×5.0m 縦置き …… 1基

③タンク分割連通方式

M／T： 概略寸法 φ 2.5m×3.0m 縦置き …… 1基

D／T： 概略寸法 φ 2.5m×3.0m 縦置き …… 1基

これらの各方式の構成検討図を図3－2に示す。タンク循環方式は如何にタンク内の流動がピストン流になり、温度境界面からの熱影響を受けるナトリウムが少なく出来るかが重要項目である。この目的の為にはタンクは細ければ細いほど良いことになるが、現実的には製作性、輸送性、配置、及び耐震強度等の観点から程よいタンクの形状は限定されることになる。これら Make up タンク諸方式の簡単な得失比較を表3－1に示す。

高温ナトリウムから低温ナトリウム側への熱拡散の影響を見る為に、タンクの形状とナトリウム流速をパラメータにして簡易計算を実施した。その計算を添付－2に示す。結果を添付－2の中の“図1 出口位置におけるナトリウム温度変化”に示す。

これによればナトリウム流量が 1000 l／min の場合に、タンク1（直径 2.5 m）では約 680 秒後に、タンク2（直径 3.0m）では約 590 秒後にそれぞれ温度の立ち上がりが見られる。ナトリウム流量が 1500 l／min の場合にはタンク1では約 475 秒後に、タンク2では約 420 秒後に温度変化が現れる。タンク内のナトリウム流が完全なピストン流であり温度境界が断熱であれば、流量が 1000 l／min の場合には 900 秒でステップ状の温度変化が現れ、流量が 1500 l／min の場合には 600 秒後にステップ状の温度変化が現れることになる。この理想的なステップ温度変化の時間と解析上の温度変化の現れる時間差が温度拡散の及ぶ範囲である。本解析では 1 次元の対流―拡散方程式を用いていることからタンクの形状(直径)の相違に係わらず熱影響の及ぶ流れ方向の範囲は時間のみによって決まる。

表３－１　Make up タンク諸方式の比較

	利 点	欠 点
(1) 分離タンク移送方式	・供給Na温度条件の設定性が良い。 ・休転時のNa貯蔵は戻り側のダンプタンクで行う。	・タンク液位の変化により、圧力バランスに変化が生じ、Na 流量制御・試験体カバーガス制御が複雑になる。 ・タンクが２基必要となるためコスト面で不利である。
(2)① タンク内部構造に工夫を加えた縦置きタンク式	・タンク液位の変化がないため、Na 流量が安定する。	・戻り Na の混合による温度変化が生じる。 ・Na 温度変化緩和対策をとると、タンク内部構造が複雑になる。
(2)② 縦長タンク式	・タンク液位の変化がないため、Na 流量が安定する。 ・Na 温度変化緩和対策は不要である。	・戻りNaの混合による温度変化が生じる。 ・配置スペースと耐震性が不利となる。
(2)③ タンク分割連通方式	・タンク液位の変化がないため、Na 流量が安定する。 ・タンクの構造が、単純であり、耐震的にも有利である。	・戻りNaの混合による温度変化が生じる。 ・タンクが２基必要となるためコスト面で不利である。

従って、タンク出口における理想的なステップ変化の時間と解析上の温度変化の始まる時間差はタンクの断面積（直径の２乗）比に比例する。即ちタンク１とタンク２の断面積比は 2.5^2 ／ 3.0^2 ≒ 0.7 であり、上述の温度変化の現れる時間差の比は以下のようであり良く一致する。

・ナトリウム流量：1000 l ／min の場合

タンク１の時間差／タンク２の時間差＝(900-680)／(900-590)

＝0.71

・ナトリウム流量：1500 l ／min の場合

タンク１の時間差／タンク２の時間差＝(600-475)／(600-420)

＝0.69

約 10 分間(600 秒)の試験体入口温度維持のためには、ナトリウム流量 1000 l ／min の場合に１５m^3のナトリウム容量を有する直径 3.0 m以下のタンク内ナトリウムを循環させることで実現できることになる。

3.2.2 Make up タンク系統構成

Make up タンクを採用した場合の試験ループの構成を検討する。この場合、分離タンク移送方式とするか循環タンク方式とするかが基本的な選択となる。前項で検討したように循環タンク方式の成立性は大いにあると判断されるが、放射能汚染された１次ナトリウムを貯蔵する機能から、健全性の確認のためのＩＳＩ要求が求められる可能性が強いと考えられる。この目的の為にはタンク内ナトリウムを移送できることが望ましく、更に、その他の付加的な便利機能がいろいろと考えられることから、コスト合理化には反するがタンクは Make up タンクとダンプタンクの２基を有する構成がベターである。

ナトリウム系統構成の概略を図３－３に示す。構成機器は Make up タンク 、ダンプタンク、電磁ポンプ、電磁流量計、純化ユニット、プラギング系、フィルター、ろ過回収タンク、補助冷却器、補助電磁ポンプ、配管、弁及び計装品等である。補助冷却器及び補助電磁ﾎﾟﾝﾌﾟは試験体の試験後崩壊熱除去の目的で設置している。**崩壊熱レベルは定常出力の約 3%を考慮するものとして、 320w/cm×100cm×61 本×0.03 ＝ ５８．５６ kw となる。**

一方、試験体及びループからの放散熱を検討すると以下のようである。

①試験体からの放散熱：Ｑ１

“ 添付－３ 試験体からの放散熱量 ”によればナトリウム温度を380℃（＝１次容器温度）と仮定した場合、２次容器温度は約230℃となり放散熱量は１ｍ当たり約900ｗとなる。試験体１次容器のナトリウム接液部長さは約５ｍであり軸方向への熱ロスを勘案して熱放散に係わる相当長を７ｍとすると、試験体からの放散熱量は約６ kw である。（Q1＝0.9kw/m×７ m＝6.3kw≒ ６ kw）

②ナトリウムループ側からの放散熱

・配管からの放散熱：Q2

３Ｂ配管の保温外径を 0.25 m、全長を 80 mと仮定。

Q2＝0.25m×π×80m×20℃×10kcal/㎡ h℃=12566 kcal/h

≒１５ kw

・タンクからの放散熱：Q3

タンク１基の運用とし、タンクの保温外表面積を約 50 ㎡と仮定。

Q3＝50 ㎡×20℃×10kcal/㎡ h℃＝10000kcal/h≒１２ kw

③全体放散熱：QT

保温表面からの放散が主要であるが、その他配管サポートや機器の脚部からの放熱も無視できない。それらを包括的にループ側保温表面放散熱量の 20％と考える。全体放散熱量は以下となる。

QT ＝ Q1 ＋ 1.2 (Q2 ＋ Q3) ＝ 6 ＋32.4 ＝ 38.4 kw

崩壊熱の放散熱を上回る分の熱量約２０ kw（58.56－38.4≒20）は系統の構造材及び保有ナトリウムの温度を上昇させる。関連する構造材（ステインレス）を 6000 kg、ナトリウムを１５ m^3とすると両者の熱容量の総和は約 5000 kcal/℃となる。２０ kw の熱量はこれらを約 3.4℃／h の速度で昇温することになる。崩壊熱の減衰度合いがどのようなものとなるかで、必要な除熱容量は異なってくるが、**安全性ストーリー上は最少除熱容量として約２０ kw の冷却器は設置することが望ましい。**

以上の検討を考慮して、外付けナトリウムループとしての循環ループ方式とMake upタンク方式の特徴の概略比較を表３－２に示す。

3.2.3 ナトリウム漏洩対策

Make upタンク方式場合には循環ループ方式と比較して1次系ナトリウムの保有量が圧倒的に増加する。従って１次系ナトリウム漏洩対策が重要な課題となってくる。

漏洩対策を考える上では３つの段階がある。第一としてはまず漏洩を発生させないこと、第二には漏洩したとしても漏洩量を抑制できること、そして第三として漏洩の影響緩和対策である。

第一の漏洩を発生させない対策は設計、製作及び据付等建設段階の品質保証の徹底が最重要であるが、建設後の運転を継続する中でのＩＳＩを含めた点検整備の徹底も重要である。

第二の漏洩量抑制対策は設計上で十分に検討され検証されねばならない。漏洩量抑制対策には以下の大きな３つのカテゴリーがある。

①漏洩の早期検知と漏洩場所の特定機能

微少な漏洩段階での確実な漏洩検出と漏洩場所の特定によって、漏洩量の確実な抑制が可能となる。本技術は今後も更に開発改良される事が期待できるが、現時点ではＳＩＤ、ＲＩＤ等のガスサンプリング方式が主方式、接触式がバックアップ方式として選択されることになろう。

②漏洩検出後のシステムインターロック機能

漏洩検出後、ループナトリウムの早期ドレンや系統カバーガス圧力の減圧等、漏洩量抑止に寄与できるシステム上のインターロック機能の充実である。

③機器の構造、配置上の漏洩量抑止機能

動的な操作等に依存しない本質的な漏洩量抑制機能としての機器の構造及び配置等への要求事項は以下がある。

(a)高所配管引廻し：

大容量のナトリウムを内包するタンク等の自由液面より上方に配管を配置することで、配管からの漏洩時に不要なナトリウムの漏洩を抑制出来る。

表3－2 循環ループ方式とMake upタンク方式の比較

	ループ型	Make upタンク方式 （分離タンク移送式）	Make upタンク方式 （タンク循環式）
系統構成	1次Naループの途中に試験体を配置しNaを供給する。付属設備として、熱交換器には2次冷却系（冷却材は別途検討）が必要となる。	Make upタンクから試験体にNaを供給し、ダンプタンクへ戻す。	Make upタンクから試験体にNaを供給し、Make upタンクもしくはダンプタンク（Make upタンクと連通）へ戻す。
試験条件安定度	・試験開始後の供給Na温度条件制御に難しさがある。（熱交換器のフィードフォワード制御） ・Na供給系の能力による試験時間の制限は無い。	・試験開始後の供給Na温度条件は安定する。 ・2つのタンクの液位変化による圧力バランスが微妙なため、Na流量制御・試験体カバーガス制御の複雑化が生じる。 ・試験時間には制限がある。	・試験開始後の供給Na温度条件は変化する。 ・タンクを1つ、もしくは連通することにより、Na流量制御・試験体カバーガス制御の複雑化はない。 ・試験時間には制限がある。
配置スペース	ループの配置スペース以外に、2次冷却設備の配置スペースが必要となる。	Make upタンク、ダンプタンクの設置スペースは最低限必要となる。	タンク循環方式によって、配置スペースは変わる。（別資料を参照）
構成機器	ダンプタンク、膨張タンク、熱交換器（2次冷却設備が必要）、電磁ポンプ、電磁流量計、純化ユニット、プラギング計、フィルター、配管、弁、計装品	Make upタンク、ダンプタンク、補助熱交換器（2次冷却設備は不要）、電磁ポンプ、電磁流量計、純化ユニット（タンク内装型）、プラギング計、フィルター、配管、弁、計装品	Make upタンク、（ダンプタンク（タンク分割連通方式のとき必要））、補助熱交換器（2次冷却設備は不要）、電磁ポンプ、電磁流量計、純化ユニット（タンク内装型）、プラギング計、フィルター、配管、弁、計装品

本要求の中にはタンクに接続する配管ノズルの設置位置も含む。

(b)ドレン専用配管等のサイホンブレイク

タンク内のナトリウム液面までのドレン専用配管等については、必ずタンク内でサイホンブレイクするような開口を設ける。

第三の漏洩の影響緩和対策としては以下の事項が考慮されることになる。

①ナトリウム火災燃焼の抑制対策

この目的の為には例えば“もんじゅ”の１次系窒素雰囲気ライナー室並みのセル内へのループ設置が考えられる。ループの運転中のアクセスが被爆安全上から好ましくないと考えられ、運用上からも窒素雰囲気セル内のループ設置は許容されうる考えである。

Make up タンク方式の場合には冷却器も前節で検討したようにせいぜい２０ kw 程度のものが崩壊熱除去用に必要とされるだけであり、寸法形状及び熱負荷の観点からも窒素セル内へのループの格納性は可能と判断される。

“もんじゅ”の漏洩事故以来、ナトリウム漏洩に対する注目度は従来とは格段に異なる高さにあり、特に放射性を伴う１次系の取扱いは実験設備といえども厳しい対応を考慮する必要がある。本書では鋼製ライナ内張り不活性ガス雰囲気室へのループ設置を推奨する。試験体に接続するナトリウムの出入り口配管対応は、キャッチパン施工と可能ならば試験炉上部室を不活性雰囲気に置換できるものとしたい。

3.2.4 試験ループの全体配置

前述までの検討をベースに１次ナトリウム系ループ Makeup タンク方式のうちタンク分割連通方式について配置検討を行った。基本的な系統構成は図３－３に示すものである。

メイン配管のサイズは３Ｂとして、各機器本体の概略寸法は次頁に示す「表３－３　機器の概略寸法表」のとおりとした。

図３－４　機器配置図（立面図）及び図３－５　機器配置図(平面図)に示すように、高所配管引廻し配置を実現する為に最下階には Makeup タンク、ダンプタンクを同じレベルに設置し、他にろ過回収タンクを設置する。各タンクにはベーパトラップ（配置検討図には未記載）を介してガス系が接

続される。中間階（下）には、電磁ポンプ、プラギング計を設置し、中間階（上）には、補助電磁ポンプ、補助冷却器を設置する。最上階にはフィルタを設置する。このように機器を配置することによりループユニットのサイズは、概ね縦6m×横11m×高さ14m程度の4層構造となる。Makeupタンク、ダンプタンクの上部およびフィルタ近傍にはメンテナンススペースを確保した。また、ろ過回収タンクおよびフィルタには遮蔽体を設置する必要がある。試験孔部のNa配管への接続は、Na配管連絡スペースをオペフロ下方に設け、炉中心部の試験体へ接続する。1次Na系室および炉心部のオペフロ下部は、万一のNa漏えいに備えて不活性ガス雰囲気室とし燃焼抑制対策とする。

本配置図にはガス系の配管、機器及び電気制御系の配線、ダクト類が省略されており、ナトリウム配管、機器に取り付けられる断熱材等が表わされていない。従って、配置図で見る限りはかなり余裕のある配置に見えるが、実際に必要な品物が全て配置されたときは、かなり手狭に感じることになる。

参考として空気冷却器構造図、タンク内蔵型コールドトラップ構造図、及び外置き型コールドトラップ構造図を添付－5に示す。

表3－3 機器の概略寸法

機器名	基数	概略寸法	備考
Makeupタンク	1	φ 3.0m×h4.0m 縦置き	ステンレス鋼
ダンプタンク	1	φ 3.0m×h4.0m 縦置き	ステンレス鋼
電磁ポンプ	2	幅 0.6m×高さ 0.6m×長さ 2.0m	流量 60m³/h 揚程 40m-Na
電磁流量計	1	幅 0.3m×高さ 0.3m×長さ 0.5m	流量 100m³/h
ベーパトラップ	3	φ 0.3m×h1.0m 縦置き	ステンレス鋼
フィルタ（大）	1	幅 0.6m×高さ 0.6m×長さ 0.8m	
フィルタ（小）	2	幅 0.4m×高さ 0.4m×長さ 0.4m	
プラギング計	1	幅 1.0m×奥行き 0.6m×高さ 1.7m	
ろ過回収タンク	1	φ 0.8m×h1.6m 縦置き	ステンレス鋼
補助電磁ポンプ	1	幅 0.4m×高さ 0.4m×長さ 0.5m	
補助冷却器	1	幅 1.2m×奥行き 0.4m×高さ 1.7m	

3.2.5 試験体側からの要求事項

以上の試験体の切り離し構造、試験体交換設備、及び試験ループの検討を踏まえて、試験体側からの建物、原子炉構造等への要求項目をまとめると以下の様である。

(1)原子炉構造との取合い要求

①試験孔は試験体の挿入可能な形状であること。即ち試験体は下部寸法が 300 φ×3800 L、上部寸法（据付面以下）が 450 φ×5100 L であり、これの挿入可能なそれぞれの径と深さを試験孔は有すること。

②試験体上部の各種配管、ケーブル等の接続する胴のフランジ径は最少でも約 700 φである。従って交換機等との接続作業その他を考慮すると、炉上部の試験孔中心とした 1000 φの中には干渉物がないこと。

③試験孔の振動固有値は耐震上から剛と見做しうる程度のものであること。

④試験体取扱い設備として 10ton 程度の重量が試験体接続胴を介して炉上部に接続負荷されるので、余裕を見て最大負荷荷重としては約 15 tonn が考慮されること。

(2)建物構造との取合い要求

①試験体方式 C 又はDの取扱い上、試験体上部フランジ面上方に約 10m（グローブ付き接続作業胴：約 0.8m ＋ 仕切管取扱機：約 9m）の吊り代が必要である。取扱機の建物内吊り代は仕切管取扱機で約 9 m である。

②取扱機の吊り上げ作業用に約 15ton の揚重機(天井走行クレーン)が必要である。

③試験ループ〈1次系ナトリウム〉の収納スペースとして、窒素置換可能なライナー内張りの約 $6m^W \times 11m^L \times 13m^H$ のセルが必要である。

④試験ループ配管が配置される炉上部の部屋は、窒素雰囲気置換が可能なものとする。

以上のうち主要なものを図示したものが図 3-6 である。

3.3 試験体の予熱に関する検討

試験体の予熱方法の検討を実施した。ループ側はよく用いられる電気ヒータ方式で対応できる。試験体に関しては方式Dの試験体を検討対象として、検討を行う。試験体の構造物のうち予熱対象は１次容器及び内臓品である。１次容器は試験部で外径２２４㎜あり、径方向に２０㎜離れて内径２６４㎜の２次容器がある。１次容器と２次容器の間は断熱の目的で真空スペースとなっている。

予熱の方式としては、この真空スペースを使って１次容器に電気シースヒータを設置できれば、もっとも簡便な構造とすることが出来る。試験体の全体構造は図２－５及び図２－６に示すようであり、シースヒータは上部の配管等が外部と出入りする接続胴部にてその端子部を抜き出す必要がある。このためには一芯のシースヒータでは長さ約 9m の試験体を往復する距離として約２０ m の長さが必要である。試験体に接続する配管類及びケーブル類の配置上の問題からヒータ端子の数は少ないほど好ましく、この観点から二芯のシースヒータの適用性を検討した。二芯の場合には必要最少長さは約１０ m で良いことになる。

二芯のシースヒータの仕様、製作性は下表のとおりである。

シース外径 D：(mm)	発熱体径 d：(mm)	シース肉厚 t：(mm)	抵　抗 (Ω/m)	製作可能長 L：（m)	使用温度 (℃) (参考値)
3.2	0.49	0.3	11.5	60	600 以下」
4.8	0.74	0.4	5.0	25	600 以下

最少必要長さの点からはシース径の 4.8 φ、3.2 φいずれも製作可能長さは満足している。単位長さ当たりの抵抗値を見ると 3.2 φは 4.8 φの 2 倍以上あり、従って同じ長さのヒータで、同一電圧を印加した場合に 3.2 φのシースヒータは 4.2 φのものの 1/2 の出力となる。更に、シース径が太いほど一般的には絶縁性が良好であり、ヒータ表面電力密度を制限した場合の単位長さ当たりの出力が稼げることから、ここではシース外形 4.8 φ

のシースヒータを採用するものとする。

試験体取付用２芯 4.8 φシースヒータの仕様を図３－７に示す。ヒータの発熱部抵抗値はR＝５Ω/m × 7.8m ＝39 Ω、印加電圧をV＝200ﾎﾞﾙﾄとすれば出力は W＝V^2／R＝200^2／39≒1000w となる。単位長さ当たりの出力は約 130w／m である。シースヒータの表面電力密度は 1000w／（0.48cm×π×780cm）＝ 0.85w／cm^2 となり、［もんじゅ］等の予熱ヒータの表面電力密度の推奨値：１ w／cm^2 以下を満足している。

試験体予熱に必要な予熱ヒータの容量は、昇温時間の制約がなければ基本的に所定の予熱温度における放散熱分があれば良いことになる。この放散熱については 3.2.2 節で述べたように“添付－３　試験体からの放散熱量”によれば１次容器の予熱温度を 200℃とすれば約 300w/m である。本試験体の真空断熱構造等の通常予熱に無い特殊要因を考慮して必要ヒータ容量を放散熱計算値の２倍、600w／m とすれば、図３－７に示すシースヒータが５本必要になる。試験体の１次容器は 224 φであるから、１次容器の周囲に約 140 ㎜ﾋﾟｯﾁで５本のシースヒータを抱かせることになる。

ただし、真空雰囲気の中で、１次容器にシースヒータを沿わせてバンド止めしただけで、ヒータから１次容器への伝熱が通常の空気雰囲気中と同じに行われるかという問題点が残る。接触によるヒータ／１次容器間の熱伝導とヒータ／１次容器／２次容器間の輻射伝熱の問題であり、それぞれの特性値は必ずしも明らかでない。定性的には、“添付－３　試験体からの放散熱量”に展開した１次容器と２次容器の温度関係よりヒータからの直接の輻射寄与により２次容器の温度は上がる。従って放散熱量は増加することになる。一方、２次容器の温度が上昇することで１次容器から２次容器への輻射伝熱量は減少する。これらのバランスの上に、ヒータの温度が何度ぐらいに納まるかが、ヒータの熱的健全性の判断基準となる。本シースヒータでは使用温度 600℃以下とあり、これは一般的条件下で被加熱側の温度をさしており、ヒータ自身の表面温度は+100～200℃である。

本課題に関しては、不特定要素の多い解析計算によるより、簡易な実験装置にて真空環境下での予熱特性試験の実施を推奨する。

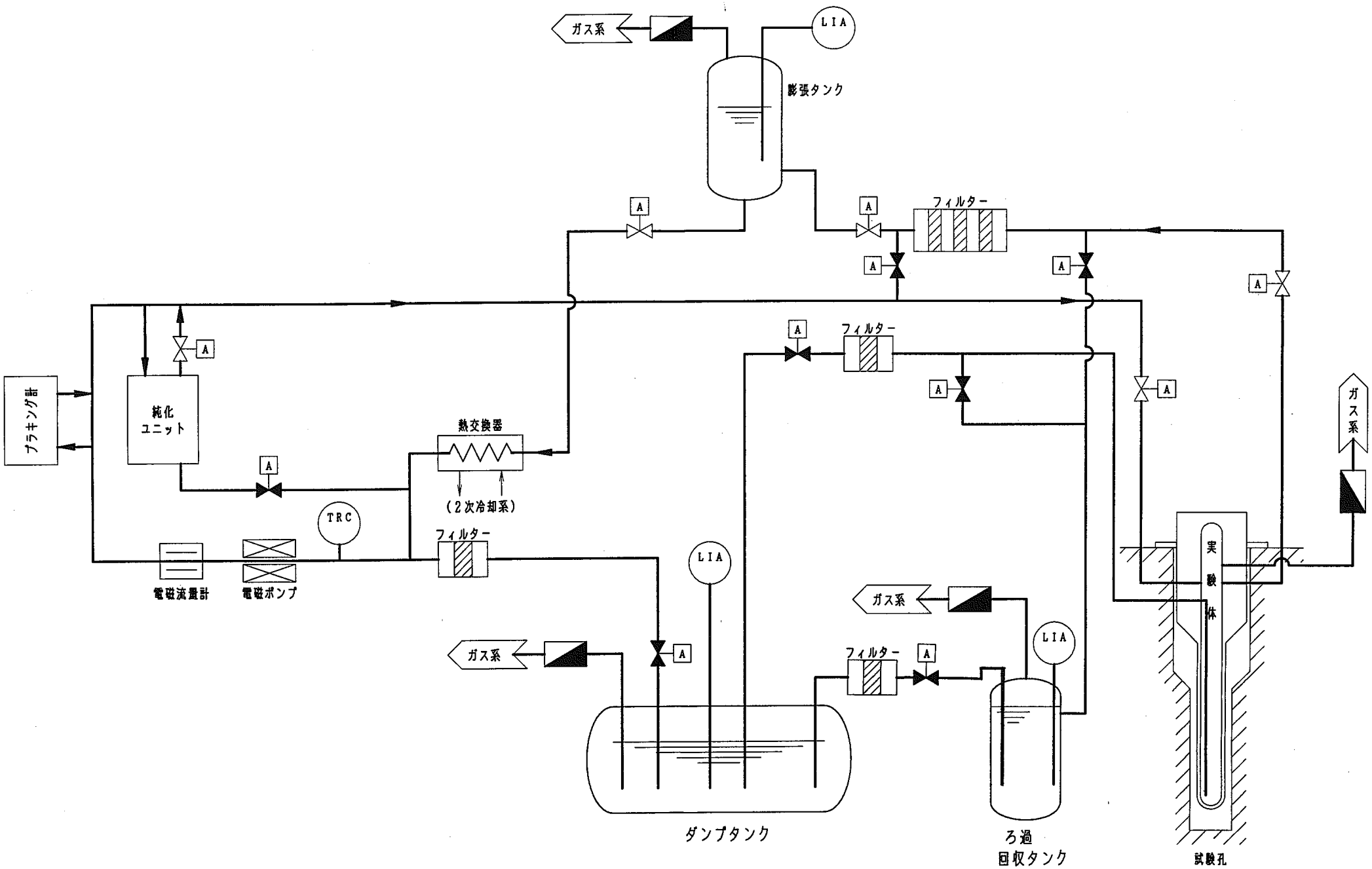


図3－1　1次ナトリウム系統概略図
(循環ループ方式)

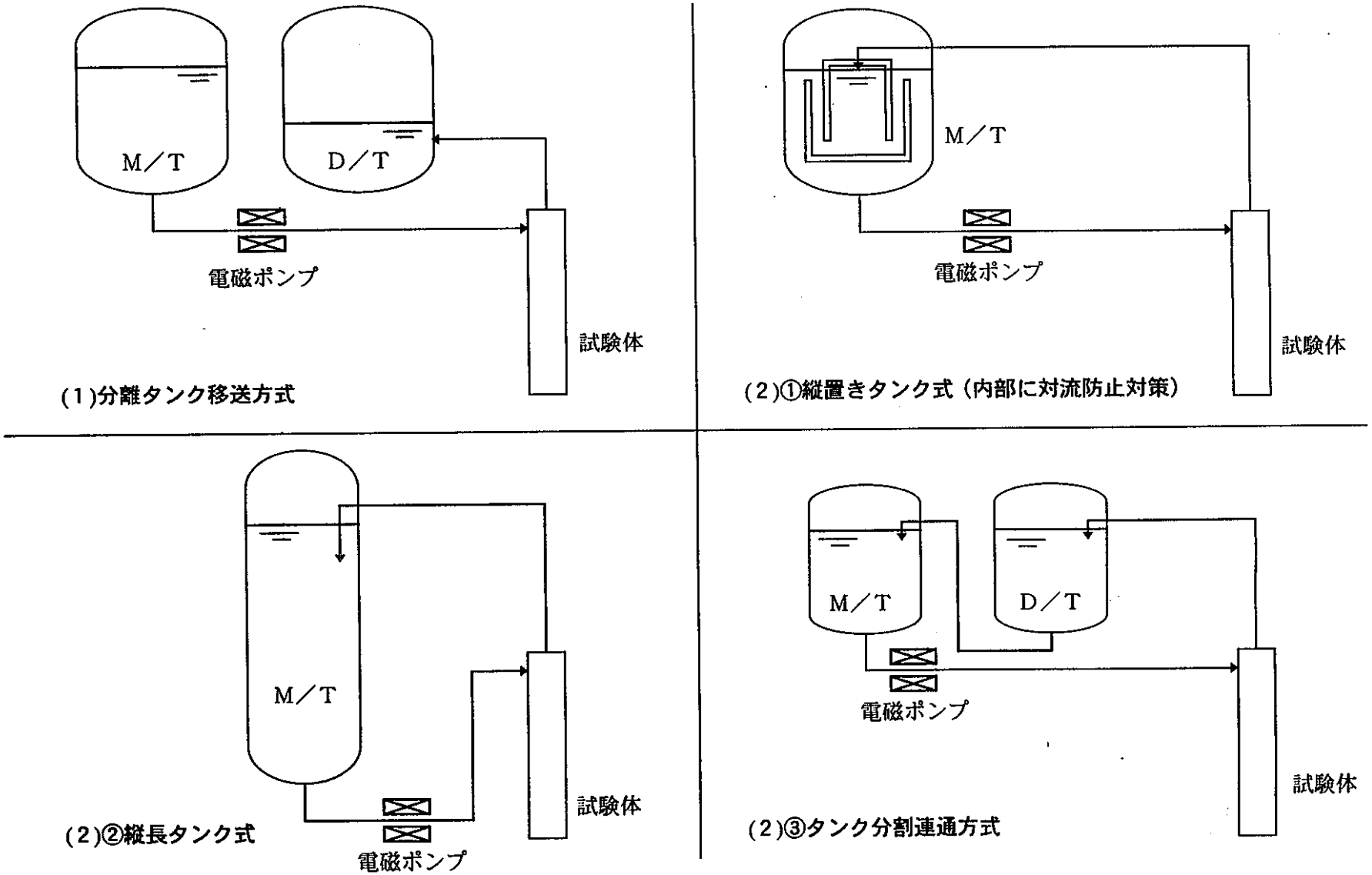


図３－２　Make up タンク（M／T）方式構成検討図

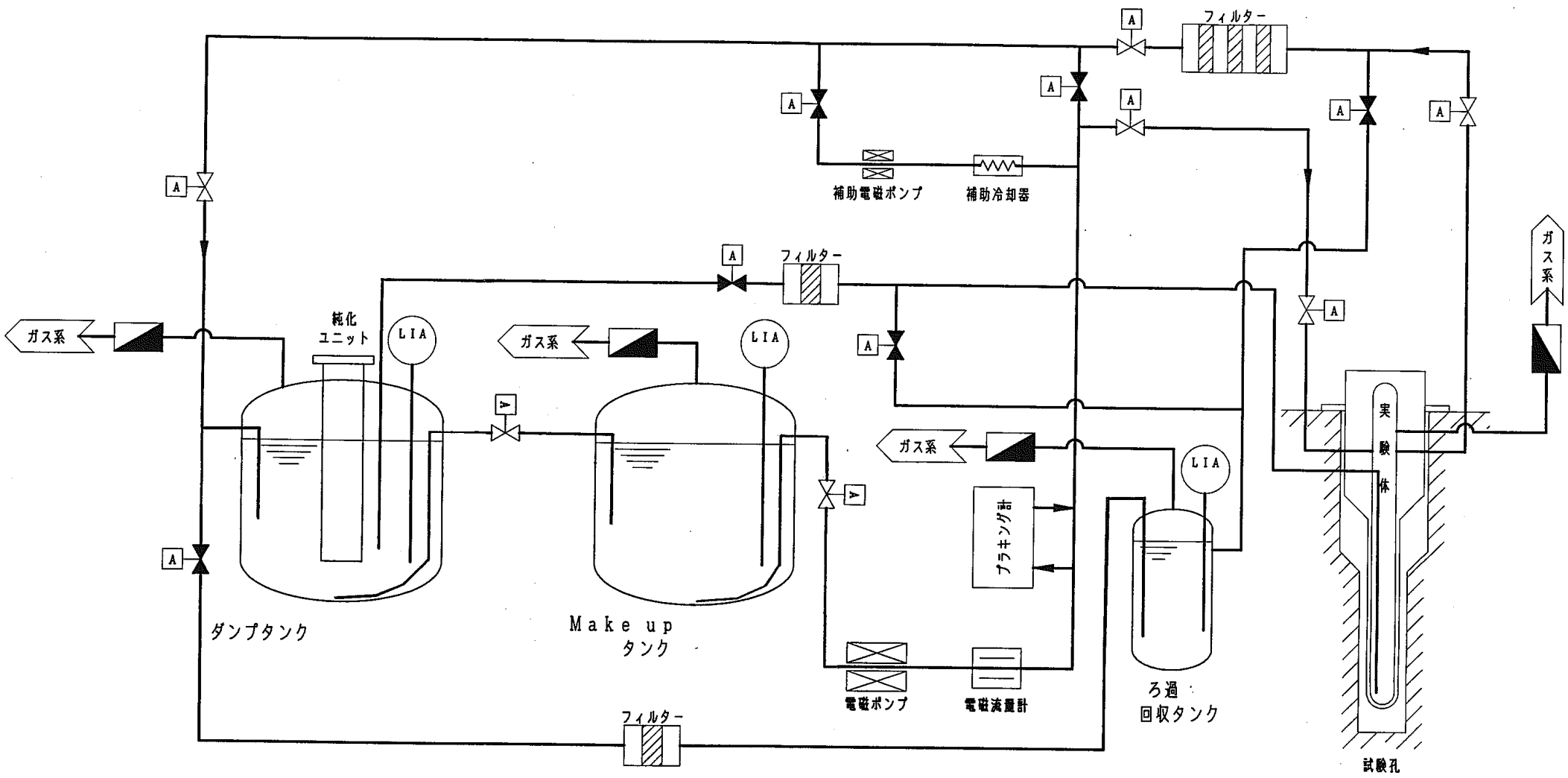


図3－3　1次ナトリウム系統概要
（Make upタンク方式）

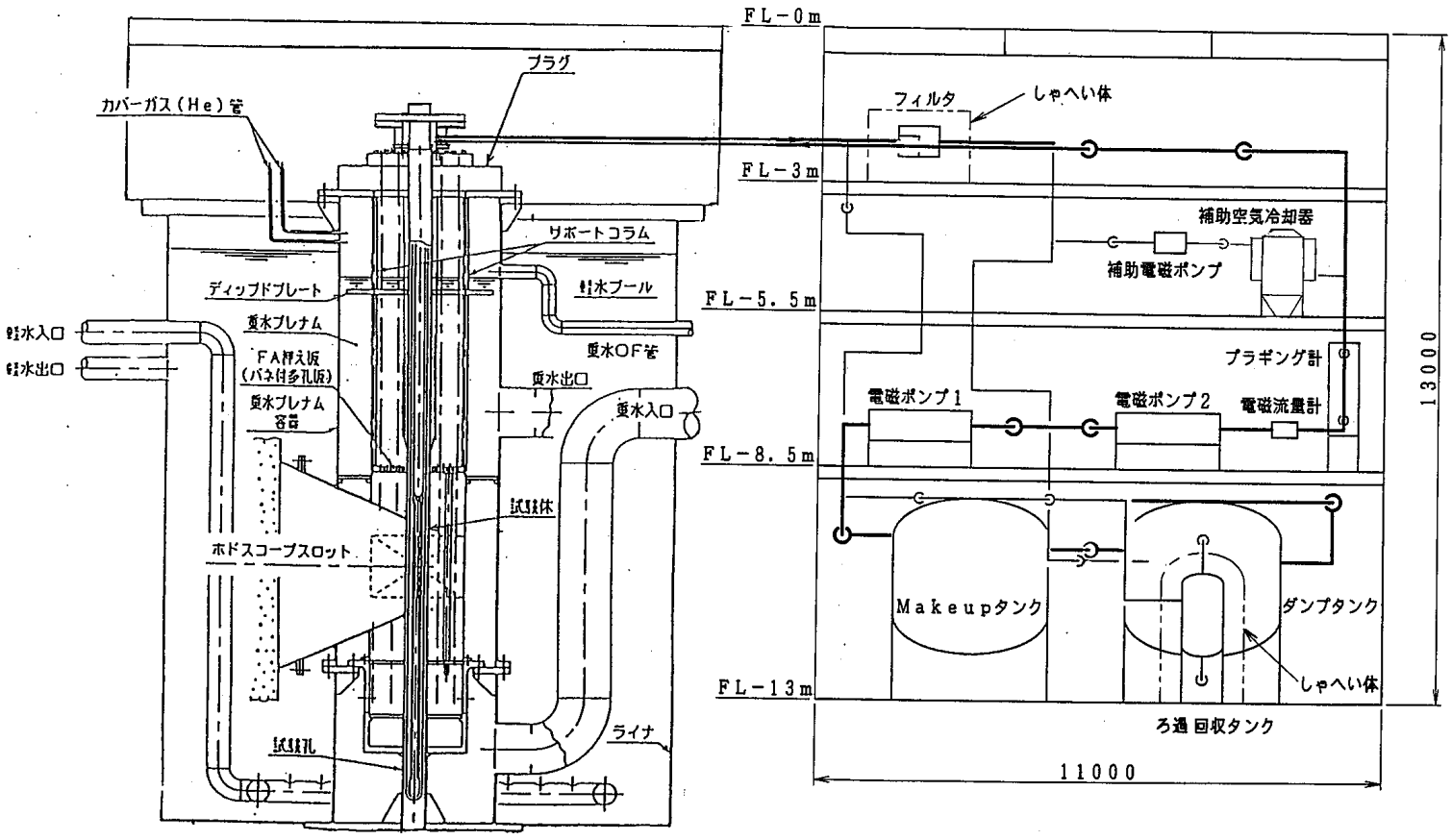


図3−4　機器配置図（立面図）

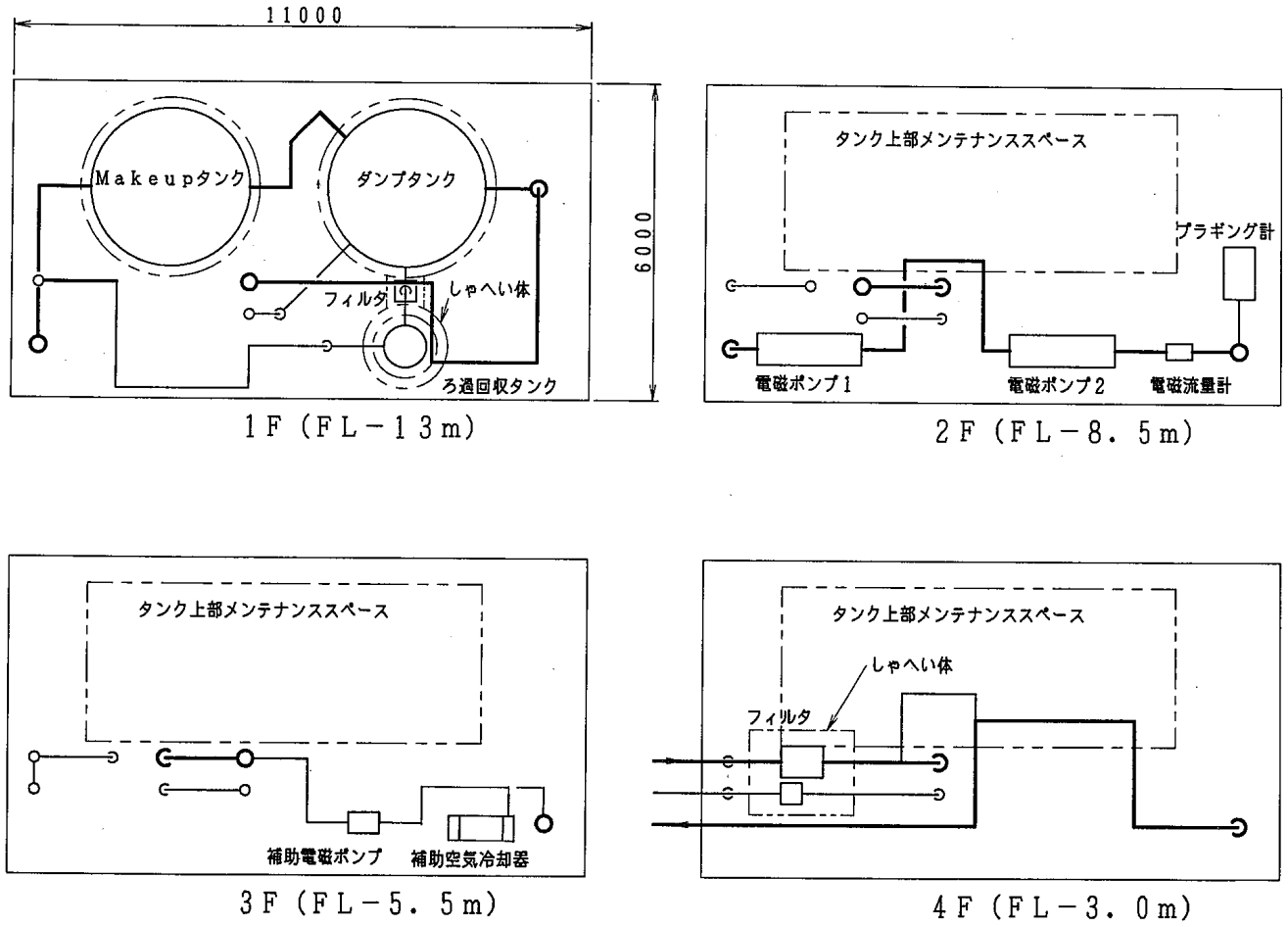


図3－5　機器配置図（平面図）

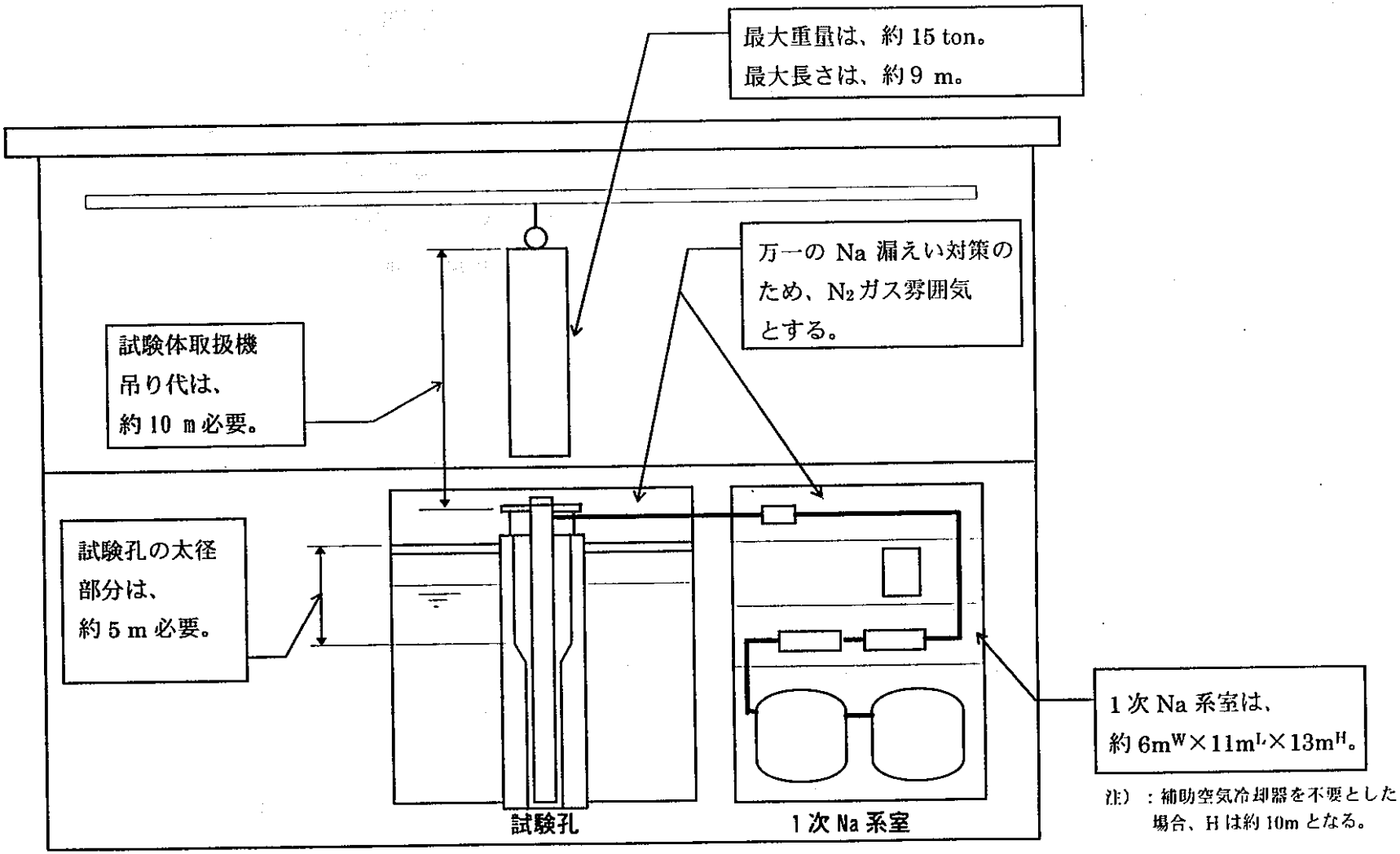
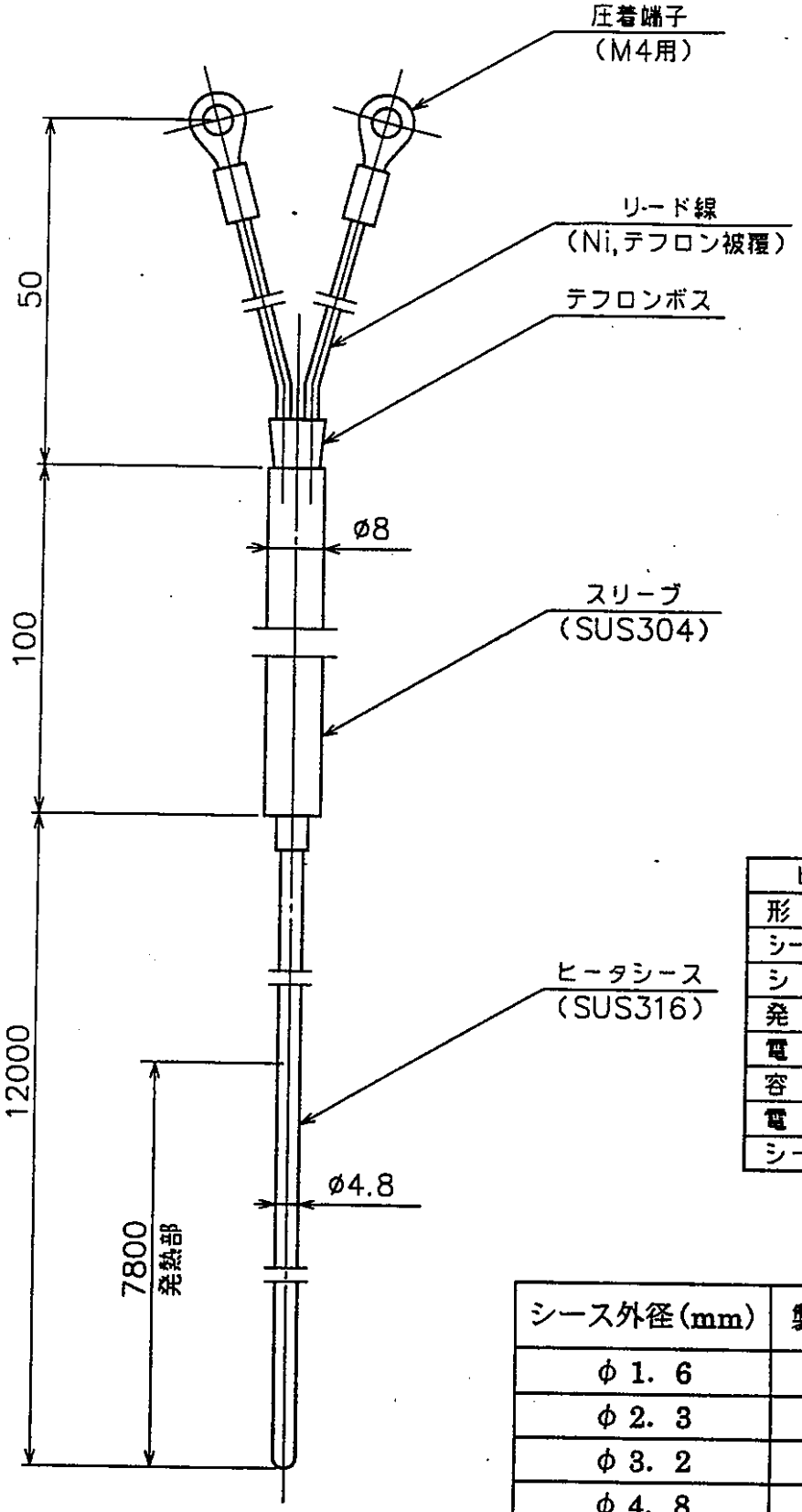


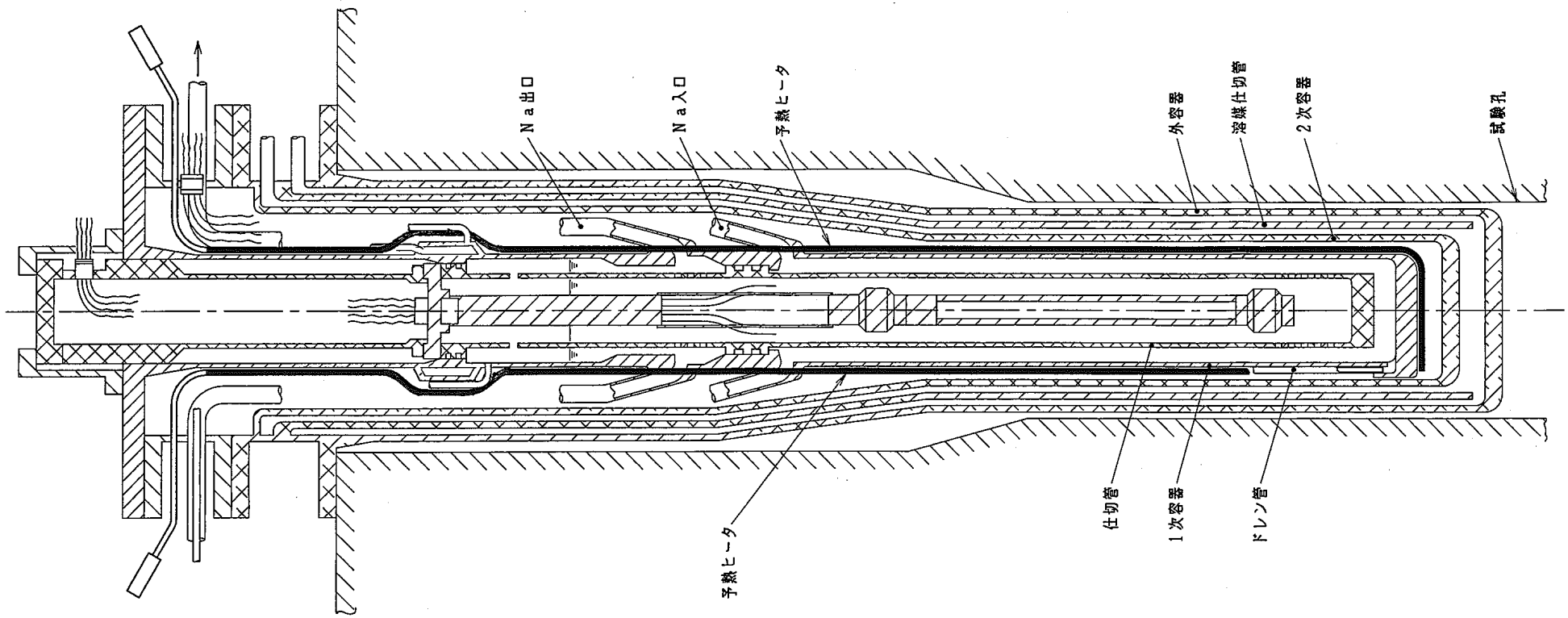
図 3-6　試験体から見た建屋、原子炉等への要求事項



ヒータ仕様	
形式名称	シースヒータ
シース外径øD	ø4.8 mm
シース長	12000 mm
発熱長	7800 mm
電圧	200 V
容量	1000 W
電力密度	0.85 W/cm²
シース材質	SUS316

シース外径(mm)	製作可能長 (m)
φ1. 6	100
φ2. 3	120
φ3. 2	60
φ4. 8	25

図3－7　2芯 4.8 φシースヒータ仕様



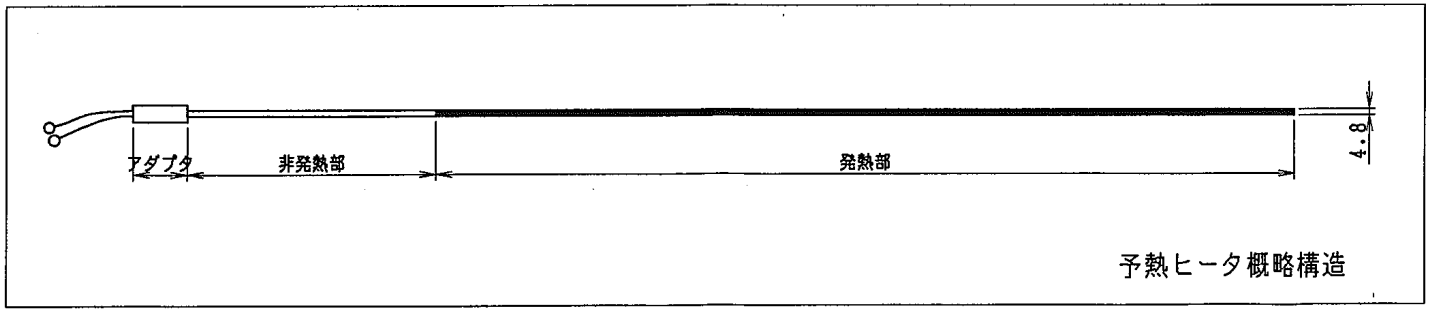


図3－8　予熱ヒータ取付概念図

4. 試験体の耐震性に関する検討

4.1 一次容器の固有振動数

(目的)

高速炉安全性試験炉の試験体は、9m程の長尺の円筒殻である一次、二次及び外容器の多層構造が特徴である。当試験炉の場合、長尺構造がゆえの構造評価の一つとして、動的な地震応答による耐震評価が考えられる。

本節では、次節の一次、二次及び外容器並びに試験孔の連性した場合の耐震評価の予備検討として、一次容器の固有振動数を検討し、構造として柔剛度を評価する。

(解析手法)

一次容器を一端固定他端自由と一端固定他端支持及び一端固定他端固定の境界条件の梁と見なし、曲げ振動に対する固有振動数 f(Hz)は、次式で計算される。

$$f = \frac{a_n^{\ 2}}{2\pi\lambda^2}\sqrt{\frac{EI}{m}}$$

表 4-1に、上式中のパラメータを示す。

表 4-2に、各境界条件で梁理論解より求まる上式中のa_nの値を示す。

(解析結果)

表4-3に一次容器の一次、二次及び三次の固有振動数の解析結果を示す。

一次容器の柔剛度を判断するには、一次の固有振動数に着目すれば良い。

一次容器の境界条件を固定－自由すなわち試験体最下部の二次容器との取り合い部を自由先端とした場合は、固有振動数は1.95 Hzと柔構造であり、動的な地震応答に対し、先端部位の振れによる変形量増大や加速度の増大が予想される。

固定－支持及び固定－固定の境界条件は、二次容器との取り合い部をピン支持及び完全固定した構造を設けた場合に相当する。その固有振動数は、それぞれ8.56及び12.42 Hzとなり、固定－自由の場合に比べて増加しており、剛な構造となっている。しかし、一般的な剛構造物の固有振動数のレベル

20Hzに比べて小さいので、完全に耐震性が確保されているとは言えない。

固定－固定の境界条件では、一次容器の軸方向の熱膨張変位を拘束するため、容器付け根部の発生応力の増大や座屈破損防止の観点から、設計上成立の困難な構造と考えられる。

構造物の成立性の観点からは、固定－支持の境界条件をベースに剛性の確保の目的で支持点を増やし、支持スパンを減少することが重要とかんがえられる。従って、一次容器と二次容器との取り合い部に何等かの耐震機能を有する振れ止め構造を軸方向に数箇所設け、その振れ止め構造は、軸方向に拘束無し、周方向に拘束が有る様に高剛性を確保した設計工夫が必要である事がわかった。

4.2 試験体全体での耐震性

(目的)

一次と二次及び二次と外容器並びに外容器と試験孔の隙間に、軸方向に数箇所に何等かの振れ止め構造を工夫できるものとし、三つの容器と試験孔が連結された系の固有振動数とモードをＦＥＭ解析により計算し、耐震性を評価する。

本節では、振れ止め構造のバネ剛性をパラメータとした系全体モデルの解析と振れ止め構造の局所的なバネ剛性を求める解析を行い、二つの解析結果から振れ止め構造の設計の考え方を示唆する。

・全体モデル解析

(解析手法)

○解析コード　FINAS Version 13.0

○解析要素　BEAM2(3次元梁要素), LCOMB2(3次元バネ減衰要素)

○物性値　ヤング率 16000(kg/mm^2), ポアソン比 0.3

○解析モデル

表 4-4に、一次、二次及び外容器の試験燃料格納部高さにおける寸法を示す。各容器の断面2次ﾓｰﾒﾝﾄを算出し、これと同じ大きさの断面2次ﾓｰﾒﾝﾄを有する等価な正方形断面の梁に置き換え、表 4-4中の板厚及び板巾を設定した。

本来、一次、二次及び三次容器の径は、駆動炉心高さに位置する試験燃料格納部と重水容器の上部プレナム部では異なるので、容器全体は径の大きさ

の異なる円筒殻が連結された変断面構造を有する。

本検討では容器形状のモデル化に当たり、剛性を柔らかめに設定し、保守的な耐震評価を行うため、表 4-4に示した試験燃料格納部高さの径が容器全長9mに渡り一律なものとして取り扱った。

○解析ケース

一次、二次及び外容器共に9mの長さとし、軸方向に11個の多質点を設け3次元梁要素でモデル化した。

一次と二次及び二次と外容器並びに外容器と試験孔の隙間の振れ止め構造は、3次元バネ減衰要素でモデル化した。

バネ要素の箇所及び位置をパラメータとしたCASE1～CASE3の計算を行い、系の振動特性に与える影響を検討した。図 4-1の(a)～(c)に、CASE1～CASE3の節点配置図を示す。

CASE1は、振れ止め構造すなわちバネ要素を軸方向(図 4-1のＹ方向)に３箇所、CASE2は４箇所及びCASE3は５箇所とした。

後述する様に、バネ要素の箇所及び位置は、バネ要素の剛性に比べて、系の固有振動数を大幅に増加させる効果がない事がわかったので、CASE2をリファレンスとした。

一次容器内の試験燃料、冷却材Na、仕切管などの構成材の総重量は、平成８年度「高速炉安全性試験炉　炉内試験体の熱収支計算と成立性調査」から約７００kgと見積もり、図 4-1中の７つの節点27～33に一律１００kgの付加質量をモデル化した。

リファレンスの解析モデルであるCASE2について、図 4-2の(a)に節点配置図、図 4-2の(b)に要素分割図及び図 4-2の(c)に要素特性配置図を示す。
尚、図 4-2に前章までの試験体概念方式Ｄの形状図を併記した。

CASE2の振れ止め構造の位置は、試験体太径部中心付近で、デッキ高さより2700mm下方に１箇所と、試験体細径部でデッキ高さより下方5400mm, 7200mm, 9000mmの３箇所に配し、図 4-2中のＸ方向のみ剛性を与えた。

図 4-2の(a)の節点番号 23, 12, 1はそれぞれ一次、二次及び三次容器のデッキ高さに位置し、境界条件として完全固定とした。

図 4-2の(a)の節点番号 200, 300, 400, 500は外容器と試験孔の振れ止め位置であり、本検討では試験孔自体は剛構造と想定し、境界条件として完全固定とした。

バネ要素の振れ方向(X方向)の剛性を100, 1000, 5000, 10000, 1E+8(kg/mm)とし、CASE4～CASE8のパラメータ計算を行った。

バネ要素の剛性をパラメータとした訳は、系の振動特性に与える影響を感度的に把握するためである。

(解析結果)

○固有振動数(CASE1～CASE3)

表 4-5に、CASE1～CASE3の一次、二次及び三次の固有振動数の解析結果を示す。一次、二次及び三次の固有振動数について、CASE1～CASE3はほぼ同じであり、バネ要素の箇所及び位置は系の振動特性に大きな影響を及ぼさない事がわかった。

また、設計製作の観点から振れ止め部を含む円筒殻と一般部円筒殻を溶接接合する箇所は少ない方が利点があるため、CASE2をリファレンスの解析モデルとし、以下のCASE4～CASE8のパラメータ計算を行った。

○固有振動数(CASE4～CASE8)

表 4-6に、各CASEの一次、二次及び三次の固有振動数の解析結果を示す。

図 4-3に、振れ止め構造のバネ定数と固有振動数の相関図を示す。

表 4-6並びに図 4-3から、振れ止め構造のバネ定数が増加するつれ、一次、二次及び三次の固有振動数は増加することがわかる。これは、三つの容器と試験孔の連結された系では、振れ止め構造のバネ定数が固有振動数に与える影響が大きい事を示している。

一般的に剛構造とは、概ね振動数20～25Hzであるので、バネ定数の大きさが数千(kg/mm)となる振れ止め構造を設ければ、系の一次、二次及び三次の固有振動数は20Hz以上となり、系として剛構造となり耐震性が確保される。

○モード(CASE4～CASE8)

図 4-4に、CASE4の一次、二次及び三次のモード図を示す。

図 4-5に、CASE5の一次、二次及び三次のモード図を示す。

図 4-6に、CASE6の一次、二次及び三次のモード図を示す。

図 4-7に、CASE7の一次、二次及び三次のモード図を示す。

図 4-8に、CASE8の一次、二次及び三次のモード図を示す。

図 4-4から図 4-8の一次のモード図から変形の位置と相対的な大きさを比

較する。バネ定数が大きくなる程一次、二次及び外容器の試験燃料格納部(節点番号31, 20, 9)及び下端部(節点番号 33, 22, 11)の変形は相対的に小さくなり、図 4-6と図4-7と図 4-8の場合は、ほぼゼロに抑えれられている。

図 4-8から、バネ定数を極限まで大きくし剛接合を仮定した場合は、二次及び外容器の変形は完全にゼロとなり、一方一次容器の試験体太径部(節点番号27, 28)で最大となる様な変形が生じている。

図 4-4から図 4-8の二次のモード図から、変形の位置と相対的な大きさを比較する。図 4-4と図4-5のバネ定数がそれぞれ100, 1000(kg/mm)の場合は、一次、二次及び外容器共に、おおまかに試験体太径部の変形と細径部の変形がS型につながっているが、図 4-6と図 4-7のバネ定数を大きくした場合は、細径部の中心で弓型に変形する事がわかる。図 4-8から、バネを剛接合を仮定した場合は、一次及外容器の変形は完全にゼロとなり、一方二次容器の太径部でS型の変形となっている。

三次のモード図については、図 4-5から図 4-8とバネ定数が増えるにつれて、試験体細径の中心(節点番号31, 20, 9)の変形は小さく抑えられている。

まとめると、耐震上留意すべき試験体細径部の中心(試験燃料格納部)については、一次と三次のモードを抑える観点では、振れ止め構造のバネ定数を約5000(kg/mm)程度に設定すれば良く、二次のモードを抑える観点では、さらに剛性を確保する必要がある事がわかった。

・振れ止め構造モデル解析

長尺構造部位間の振れ止め構造の例として、炉心燃料集合体のパッドが上げられるため、これを参考に振れ止め構造を以下の様に考察した。

一次と二次及び二次と外容器並びに外容器と試験孔の隙間に、設ける振れ止め構造の形状としては、図 4-9の(a)と(b)に示す様に、一般部円筒殻板厚に比べ、板厚増加箇所を円周に部分的に配する(a)パッド型の構造と(b)全円周に渡り板厚増加箇所を配する円環型構造が考えられる。

設計製作の観点からは、(a)と(2)を比べると、製作性の容易さと剛性の大きさから(b)の構造の方が利点がある。

図 4-9の(c)の振れ止め構造の断面図に示す様に、振れ止め構造の形状寸法を決定するものは、①長さ Lと②振れ止め部板厚 t_1及び③テーパ形状並びに④振れ止め中央部で線ないしは点接触を想定したテーパ(球面)形状が上

げられる。

図 4-9の(d)に、試験燃料格納部高さの一次、二次及び外容器並びに試験孔の隙間に振れ止め構造を設けた場合の形状概念図を示す。振れ止め構造は、各容器の外側を厚肉構造と設定している。容器の内側と外側の両側を厚肉構造とする事も考えられるが、バネ剛性は同一と考え、容器の外側のみ厚肉構造とする事とした。

以下に、図 4-9の(a)と(b)の振れ止め構造を想定し、振れ止め部近傍で局所的な変形が生じた場合のバネ定数をＦＥＭ解析により計算した。

(解析手法)

○解析コード　FINAS Version 13.0

○解析要素　QFLA4RT(4節点四辺形シェル低減積分要素)

○物性値　　ヤング率 16000(kg/mm^2), ポアソン比 0.3

○解析モデル

以下の４つの解析モデルを用いた。

・CASE9　一般円筒部外径 224mm, 一般円筒部板厚 4mm(共通)
　　振れ止め部(軸方向長さ 100mm, 巾30°, 板厚 8mm)

・CASE10　振れ止め部(軸方向長さ 100mm, 巾30°, 板厚 18mm)

・CASE11　振れ止め部(軸方向長さ 100mm, 全周, 板厚 8mm)

・CASE12　振れ止め部(軸方向長さ 100mm, 全周, 板厚 18mm)

図 4-10に、CASE9～CASE12に共通の解析メッシュ図を示す。

本検討では、振れ止め構造の局所的なバネ定数を算出するため、図 4-10中に示した中央部の節点４箇所に変位(1mm)を与えた。

図 4-10中に示す様に、境界条件は、長さ2000mmの45°円筒部の両端部を完全固定し、Line1は対称条件(X方向, Y軸及びZ軸回転拘束)、Line2は斜角(45°)支持条件とした。

図 4-11～図 4-14に、CASE9～CASE12の中央断面における板厚設定をメシュ図に合わせて示す。メッシュ上の番号１と番号２は、それぞれ一般部円筒殻及び振れ止め部を表している。

○解析結果

図 4-15～図 4-18に、CASE9～CASE12の変形図を示す。変形図から振れ止

め部近傍で局所的なへこみが生じている事がわかる。

表 4-7に、CASE9～CASE12のバネ定数の解析結果を示す。尚、バネ定数は変位を与えた節点の反力の総計の２倍を変位で割算して求めた。

CASE9とCASE10の場合は約1000(kg/mm)となり、CASE11の場合は約1500(kg/mm)、CASE12の場合は約11000(kg/mm)となる。

これより、振れ止め構造の剛性を上げるには、パッド型に比べ、全円周に渡り板厚増加箇所を配する円環型が適している事がわかる。

先の全体モデルの固有振動数の解析結果から、振れ止め構造のバネ定数は数千(kg/mm)と設定すれば、系として剛構造となる事がわかっているので、振れ止め構造の板厚は 8～18mmの間で、一般部の３倍程度に設定すれば、系として耐震性が確保出来る見通しが得られた。

試験体全体での耐震性確保のためには、梁理論による予備解析及び系全体の固有振動数解析から、一次と二次及び二次と外容器並びに外容器と試験孔の隙間に、バネ定数が数千(kg/mm)で径方向のみ高剛性の振れ止め構造を軸長に渡り、３ないし４箇所設ける必要がある事がわかった。

振れ止め構造の具体例としては、全周に渡り太径化した円環型で、その板厚は剛性確保のため、一般部の３倍程度に設定する必要がある事がわかった。

今後、さらに振れ止め構造を具体化するには、製作性や未検討の鍵型のはめ合い構造のサーベイ並びに耐震性のみならず耐熱応力に着目した構造力学検討が必要と考えられる。

表 4-1　梁の固有振動数を算出するパラメータ

E(ﾔﾝｸﾞ率)(kg/mm^2)	16000(SUS316, 550℃)
λ(梁長さ)	10m=10000mm
I(断面2次ﾓｰﾒﾝﾄ)	=π/64×(224^4-216^4)
ρ(質量密度)(kg/mm^3/s^2)	=SUS316の密度7.8E-6(kg/mm^3)/9800
A(断面積)(mm^2)	=円筒断面積=π×(112^2-108^2)
m(単位長さ質量)(kg/mm/s^2)	=ρ×A

表 4-2　梁の固有振動数を算出するパラメータ　a_n

境界条件	一次固有振動数のa_n	二次固有振動数のa_n	三次固有振動数のa_n
一端固定他端自由	1.875	4.694	7.855
一端固定他端支持	3.927	7.069	10.210
一端固定他端固定	4.730	7.853	10.996

表 4-3　梁の固有振動数の解析結果

境界条件	一次固有振動数(Hz)	二次固有振動数(Hz)	三次固有振動数(Hz)
一端固定他端自由	1.95	12.23	34.25
一端固定他端支持	8.56	27.74	57.87
一端固定他端固定	12.42	34.23	67.12

表 4-4　一次、二次及び三次容器の寸法

	円筒殻外径/内径(mm)	板厚(mm)	断面2次ﾓｰﾒﾝﾄ	等価梁寸法(mm)
一次容器	224/216	4	1.6E+7	119□
二次容器	270/264	3	2.2E+7	128□
外容器	300/290	5	5.0E+7	157□

表 4-5　FEM解析結果(CASE1～CASE3)

	ﾊﾞﾈ定数 (kg/mm)	一次固有 振動数(Hz)	二次固有 振動数(Hz)	三次固有 振動数(Hz)
CASE1	1000	9.12	13.30	18.28
CASE2	1000	11.55	14.95	22.39
CASE3	1000	12.64	15.69	22.68

表 4-6　FEM解析結果(CASE4～CASE8)

	ﾊﾞﾈ定数 (kg/mm)	一次固有 振動数(Hz)	二次固有 振動数(Hz)	三次固有 振動数(Hz)
CASE4	100	4.32	7.03	10.67
CASE5	1000	11.55	14.95	22.39
CASE6	5000	22.14	28.10	35.98
CASE7	10000	27.07	37.52	40.86
CASE8	1E+8	33.38	48.05	57.67

表 4-7　FEM解析結果(CASE9～CASE12)

	モデル	バネ定数(kg/mm)
CASE9	振れ止め部(軸方向長さ 100mm, 巾15°, 板厚 8mm)	888
CASE10	振れ止め部(軸方向長さ 100mm, 巾15°, 板厚 18mm)	1111
CASE11	振れ止め部(軸方向長さ 100mm, 巾45°, 板厚 8mm)	1508
CASE12	振れ止め部(軸方向長さ 100mm, 巾45°, 板厚 18mm)	10915

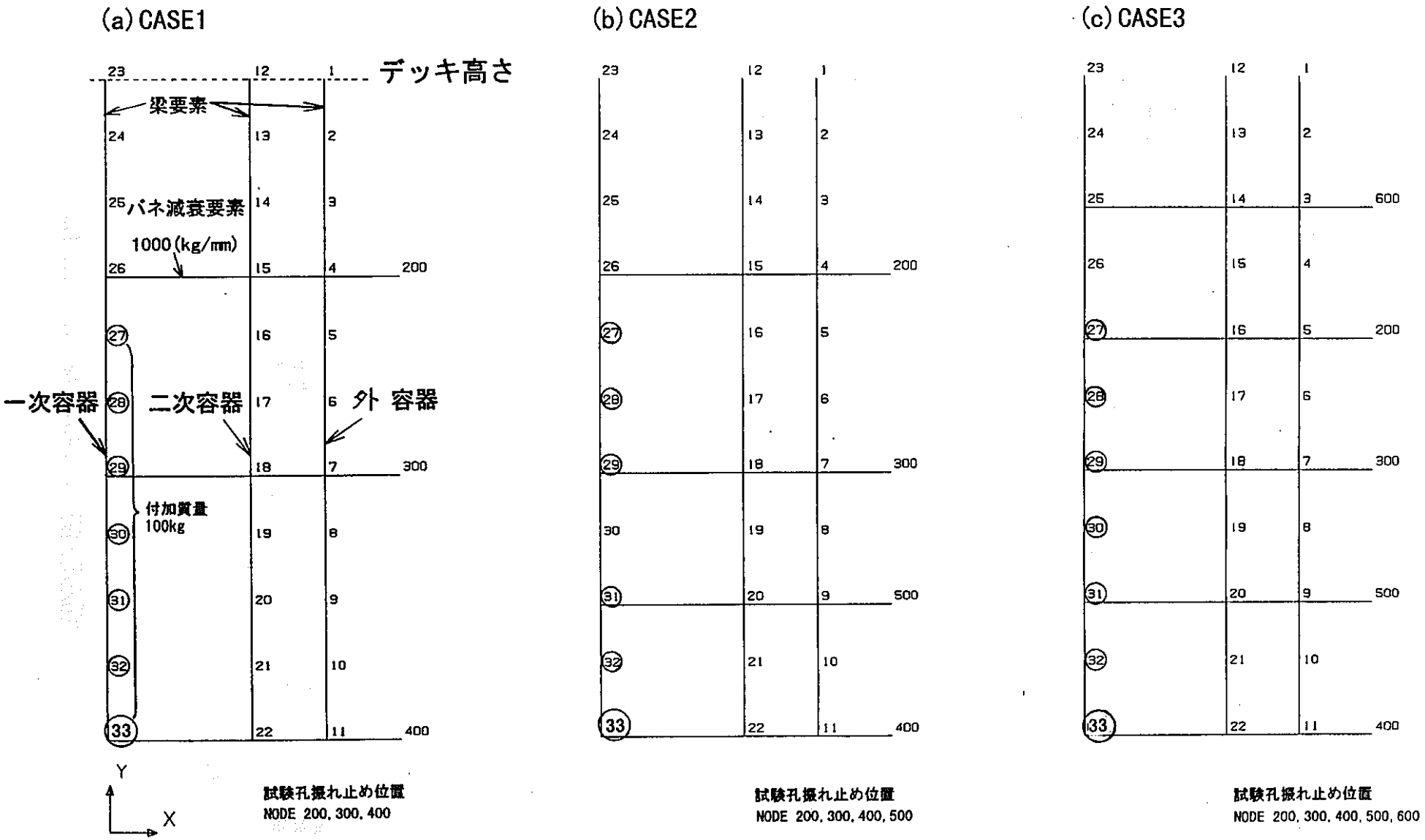


図 4-1 一次容器固有振動数解析モデルの節点配置図

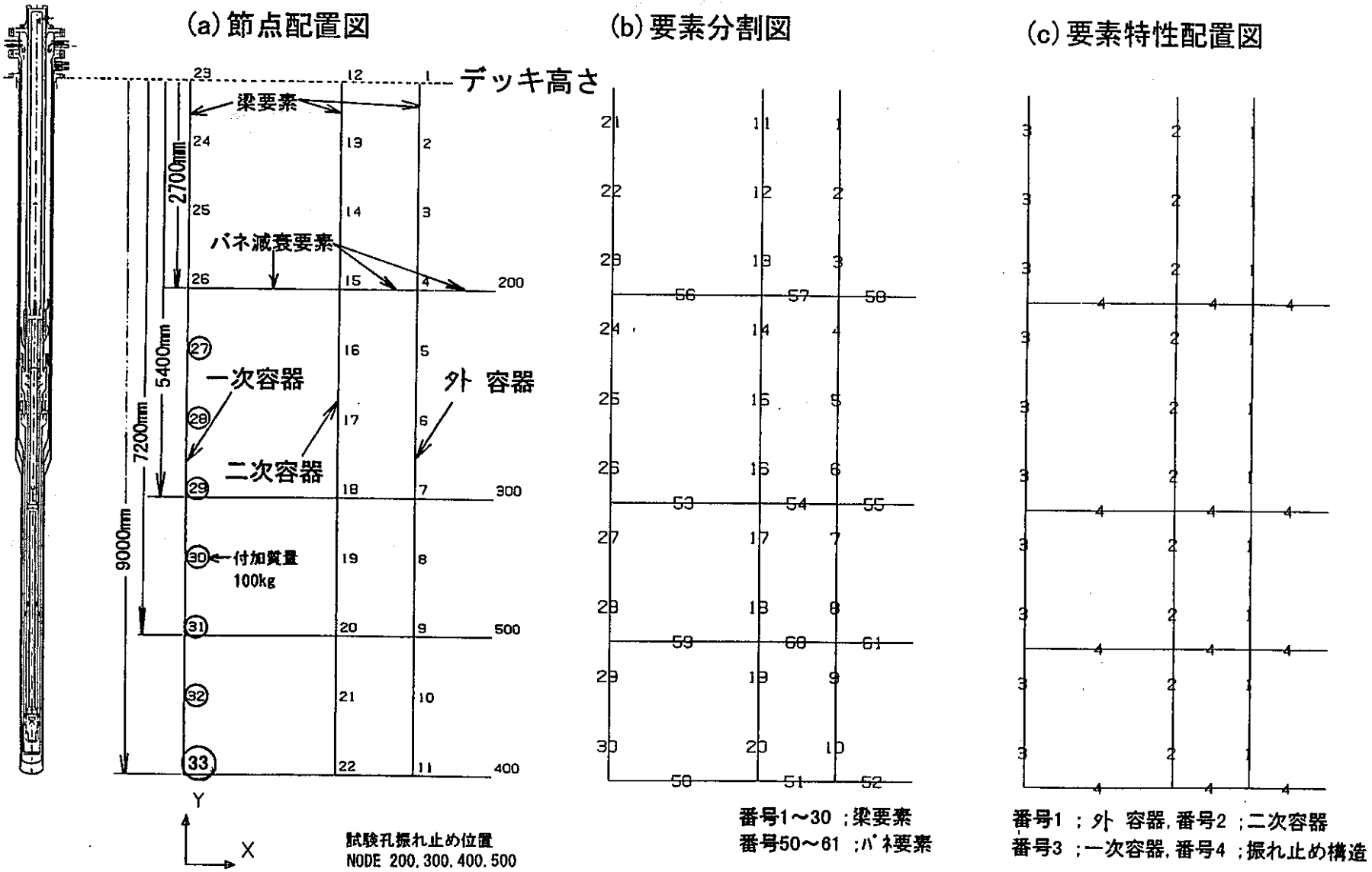


図 4-2 一次容器固有振動数解析モデル(CASE2)

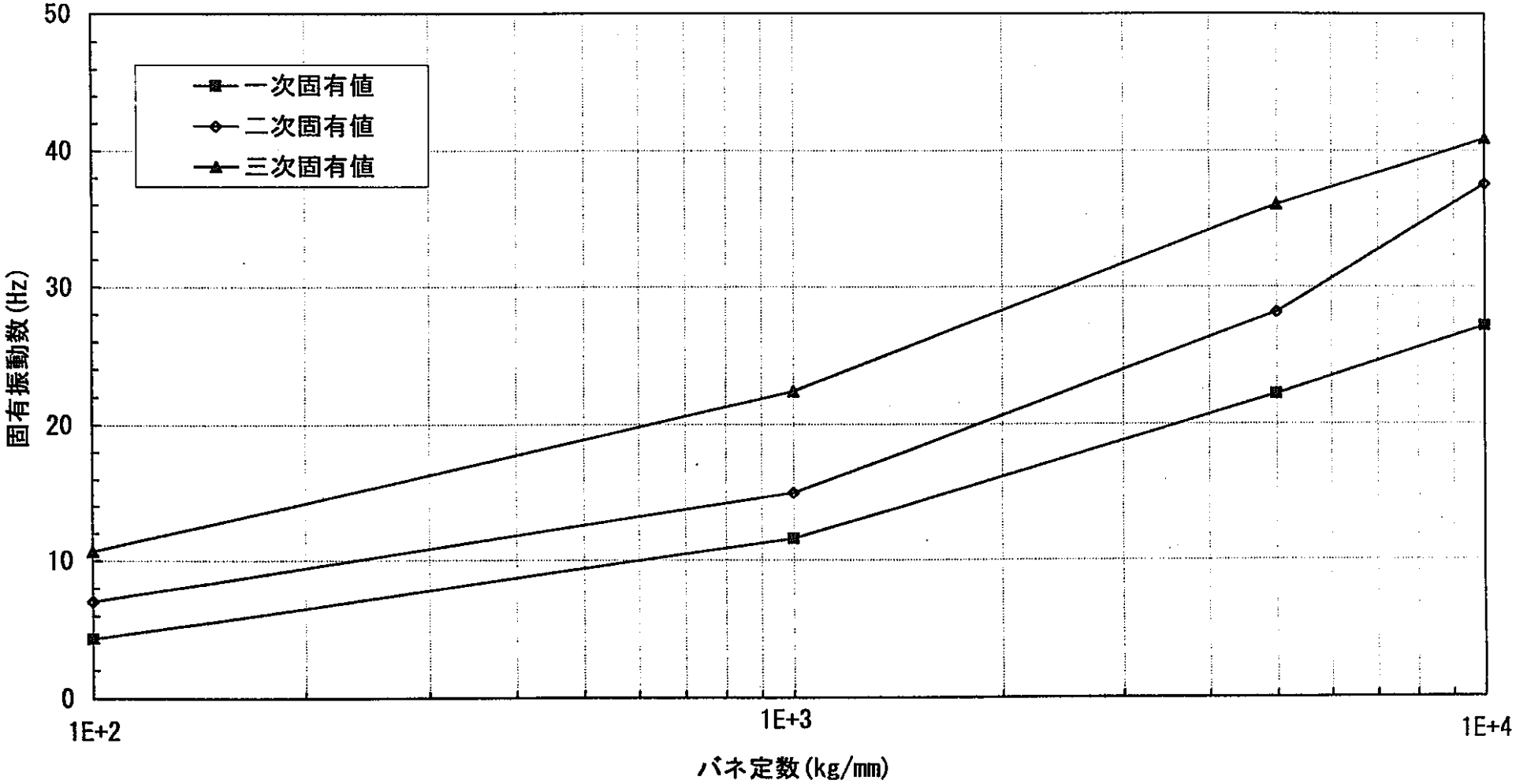


図 4-3　振れ止め構造のバネ定数と固有振動数の相関図

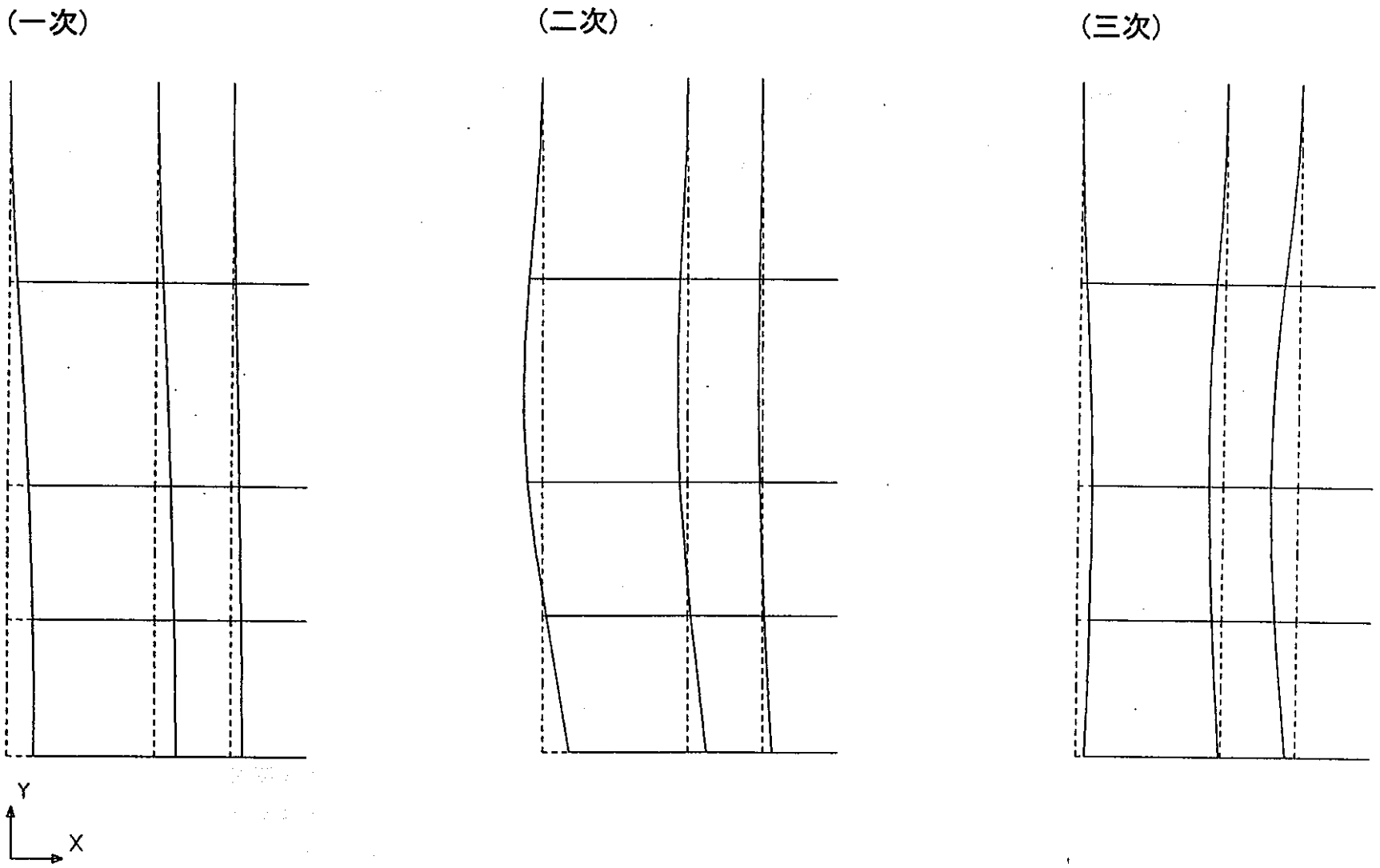


図 4-4　モード図(CASE4, バネ定数 100kg/mm)

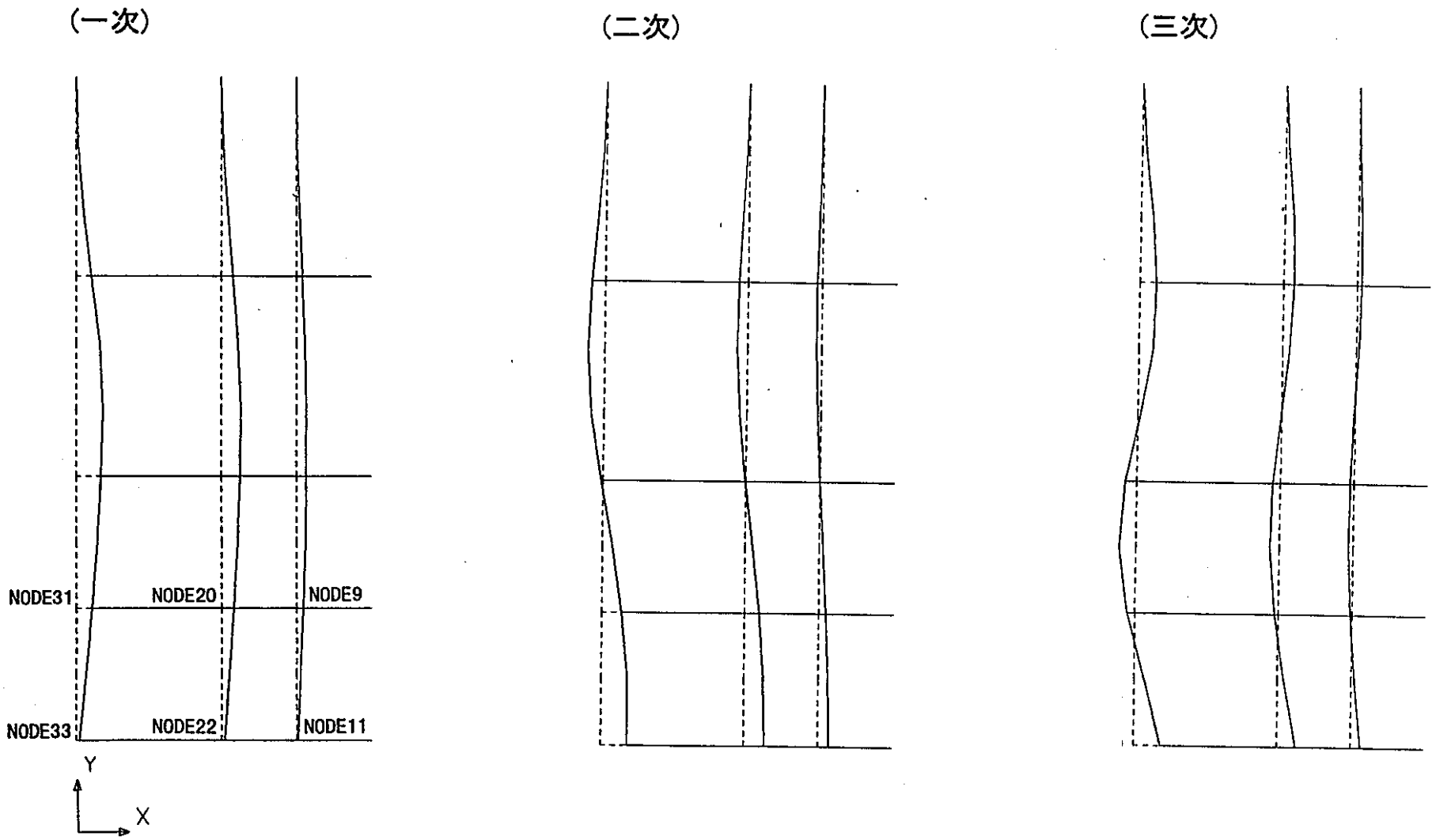


図 4-5　モード図(CASE5, バネ定数 1000kg/mm)

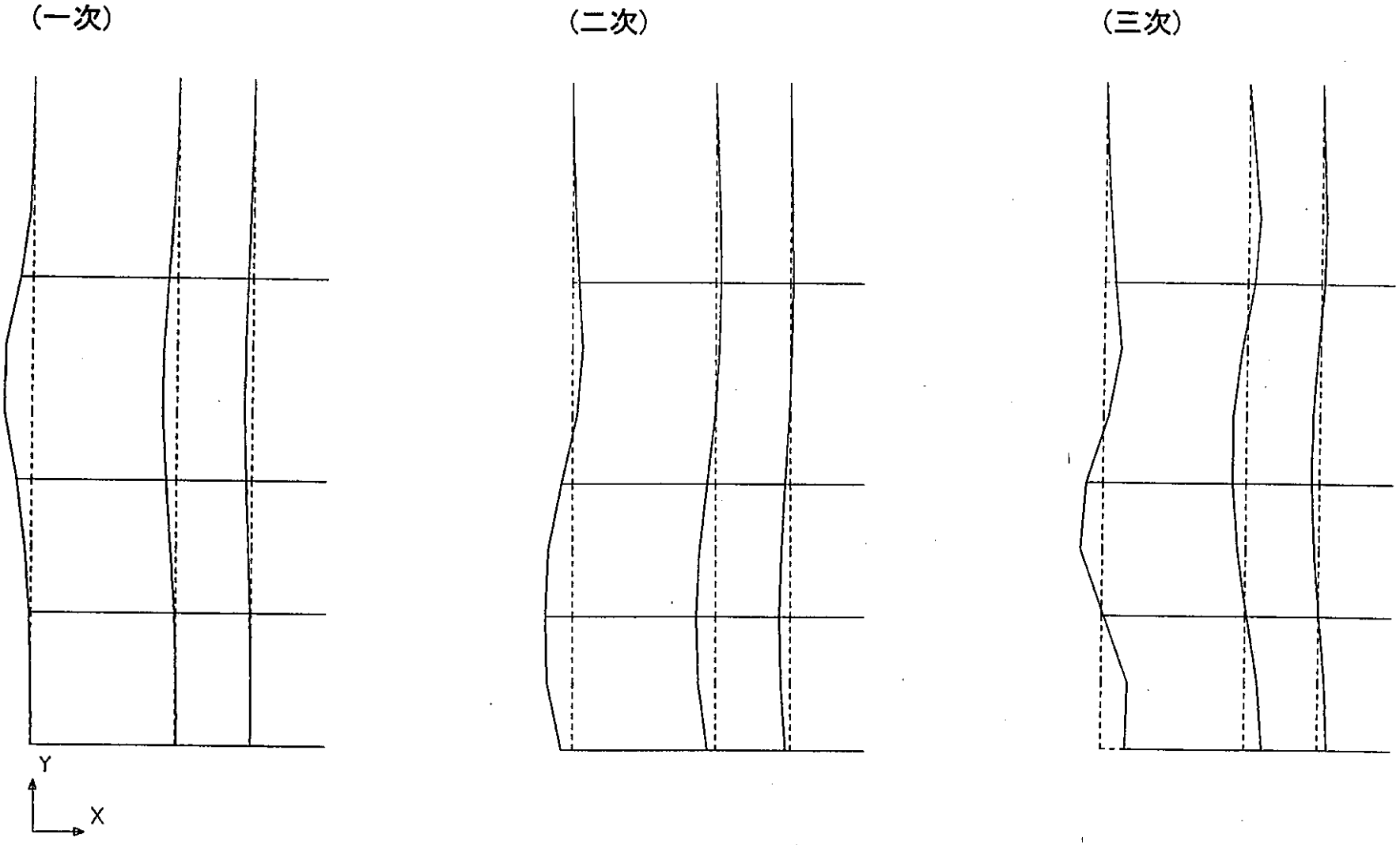


図 4-6　モード図(CASE6, バネ定数 5000kg/mm)

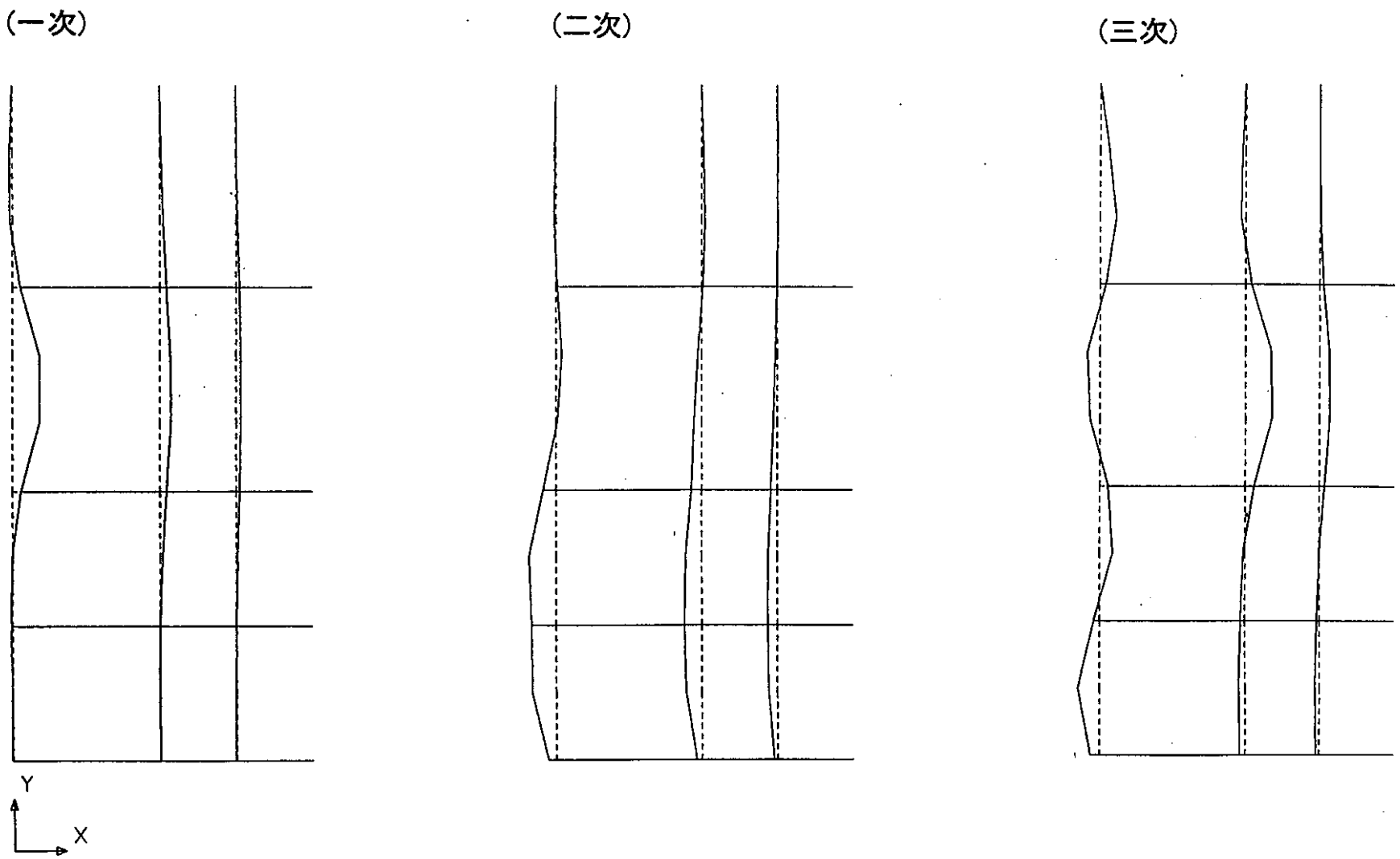


図 4-7　モード図(CASE7, バネ定数 10000kg/mm)

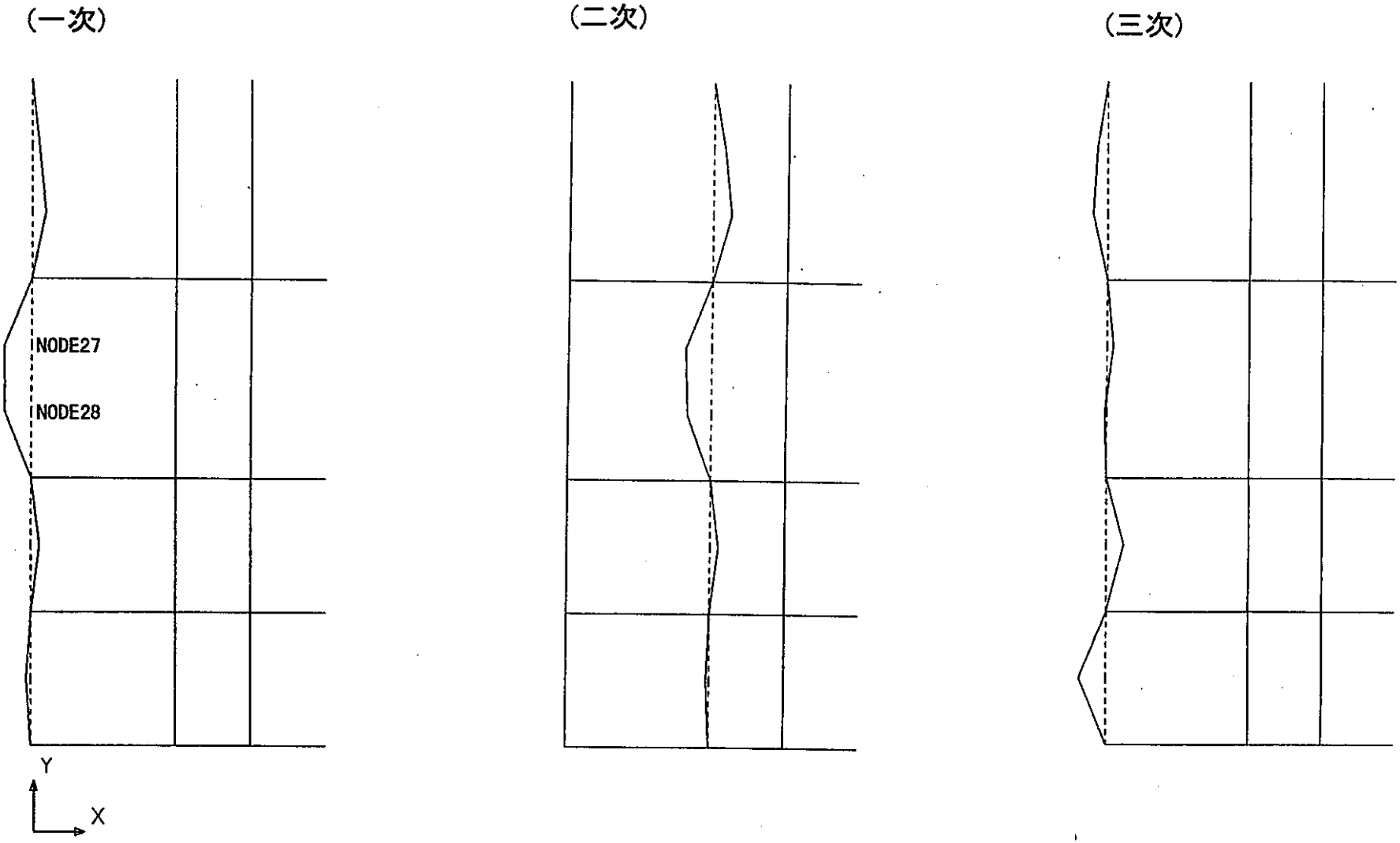
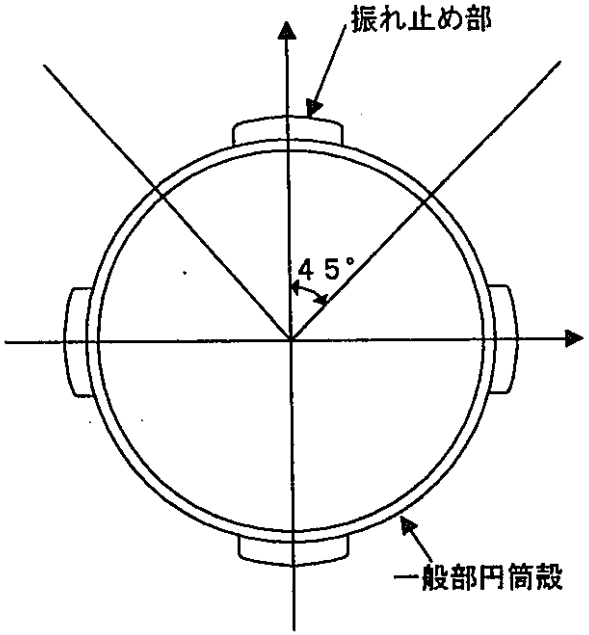
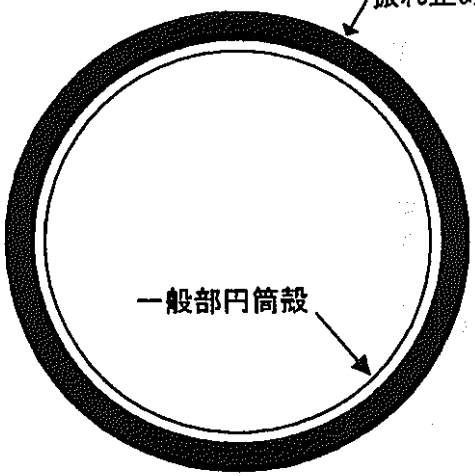


図 4-8　モード図(CASE8, バネ定数 1E+8kg/mm)

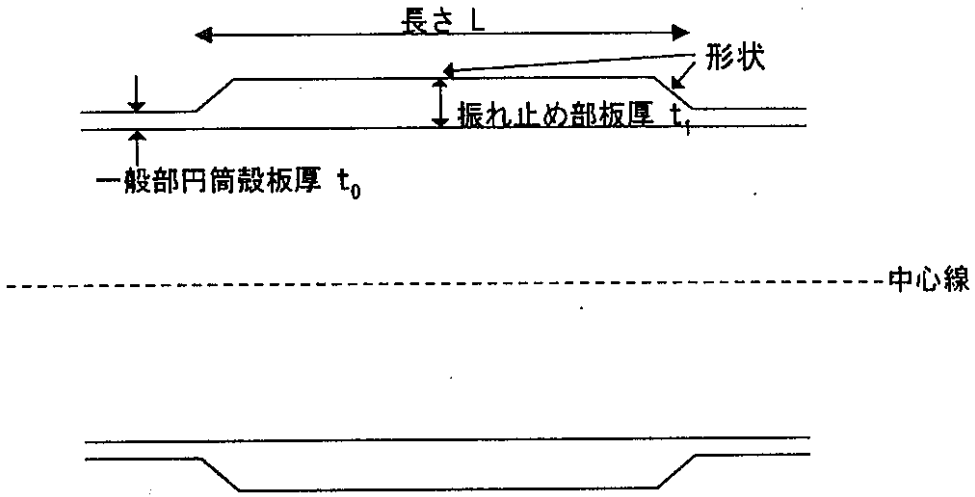
(a) パッド型振れ止め構造



(b) 円環型振れ止め構造



(c) 振れ止め構造の断面



(d) 各容器の振れ止め構造の断面

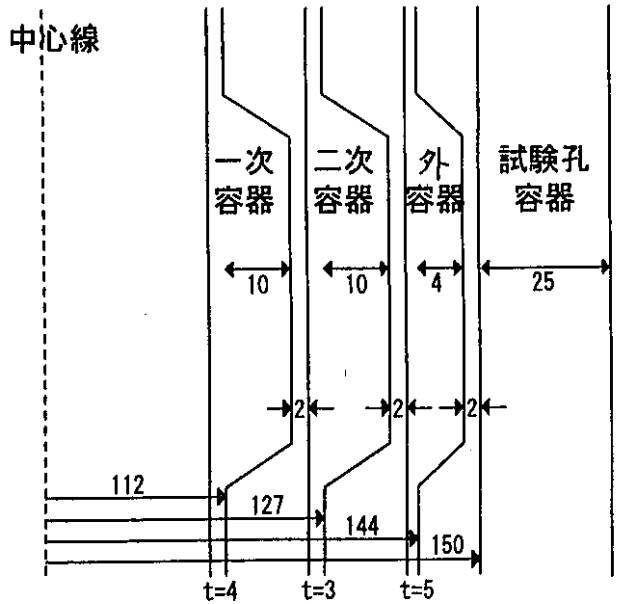


図 4-9 振れ止め構造形状概念図

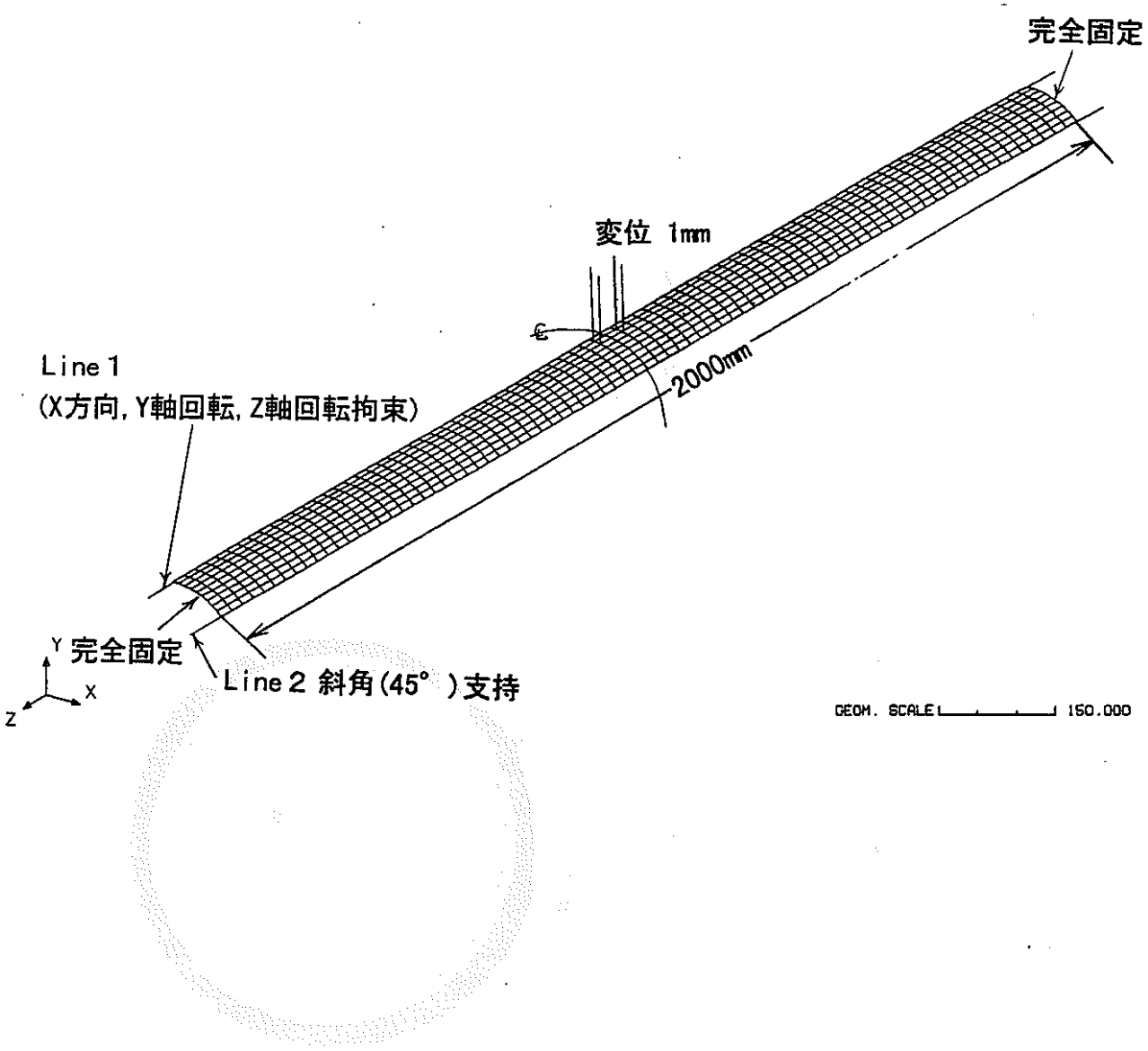


図 4-10　振れ止め構造の解析モデル図

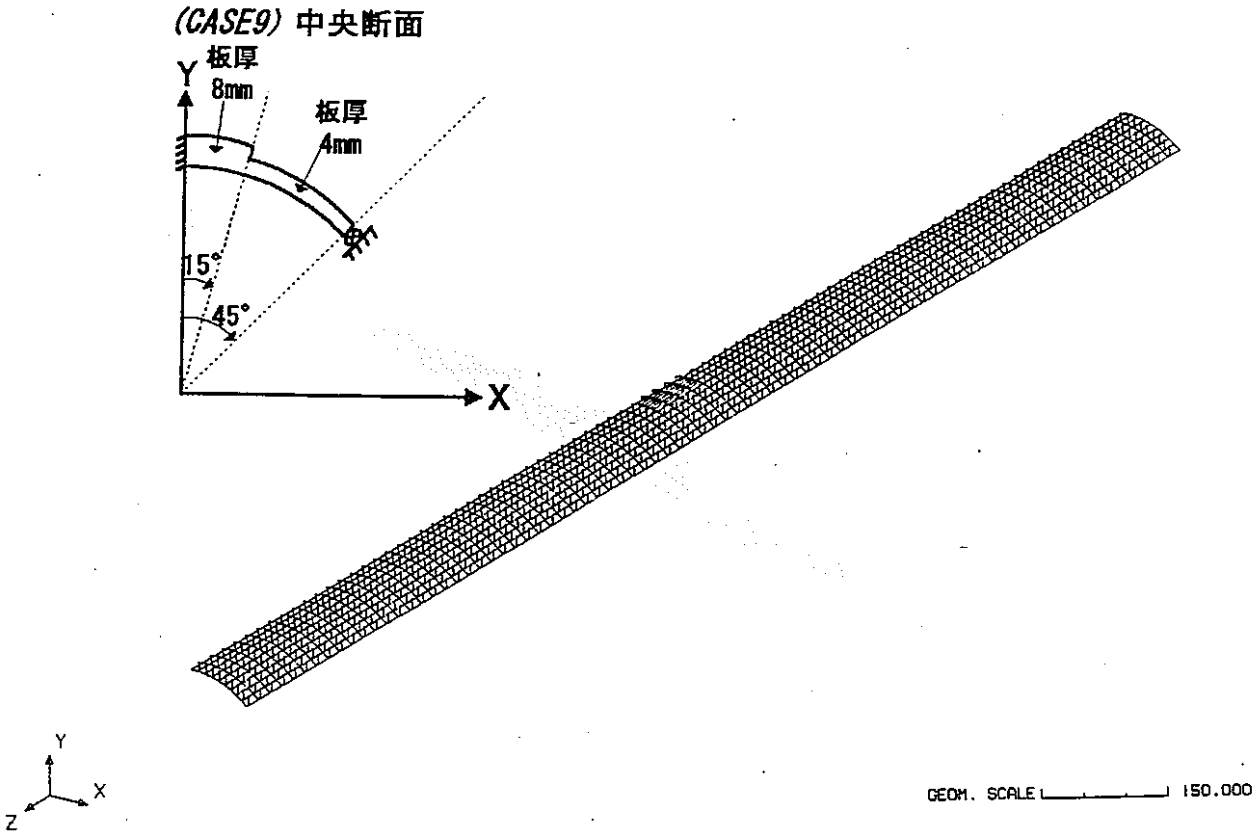


図 4-11　CASE9の中央断面の幾何特性図

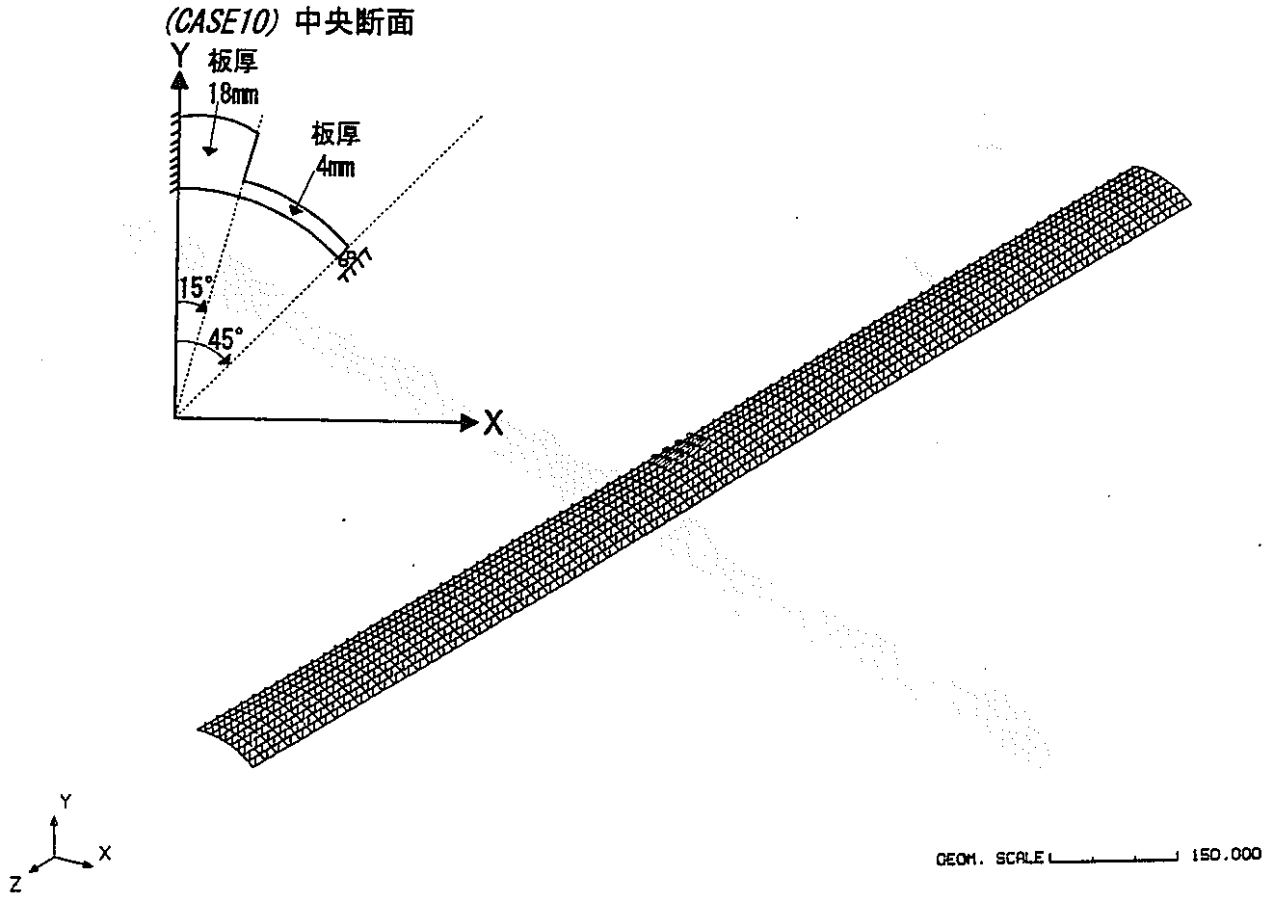


図 4-12　CASE10の中央断面の幾何特性図

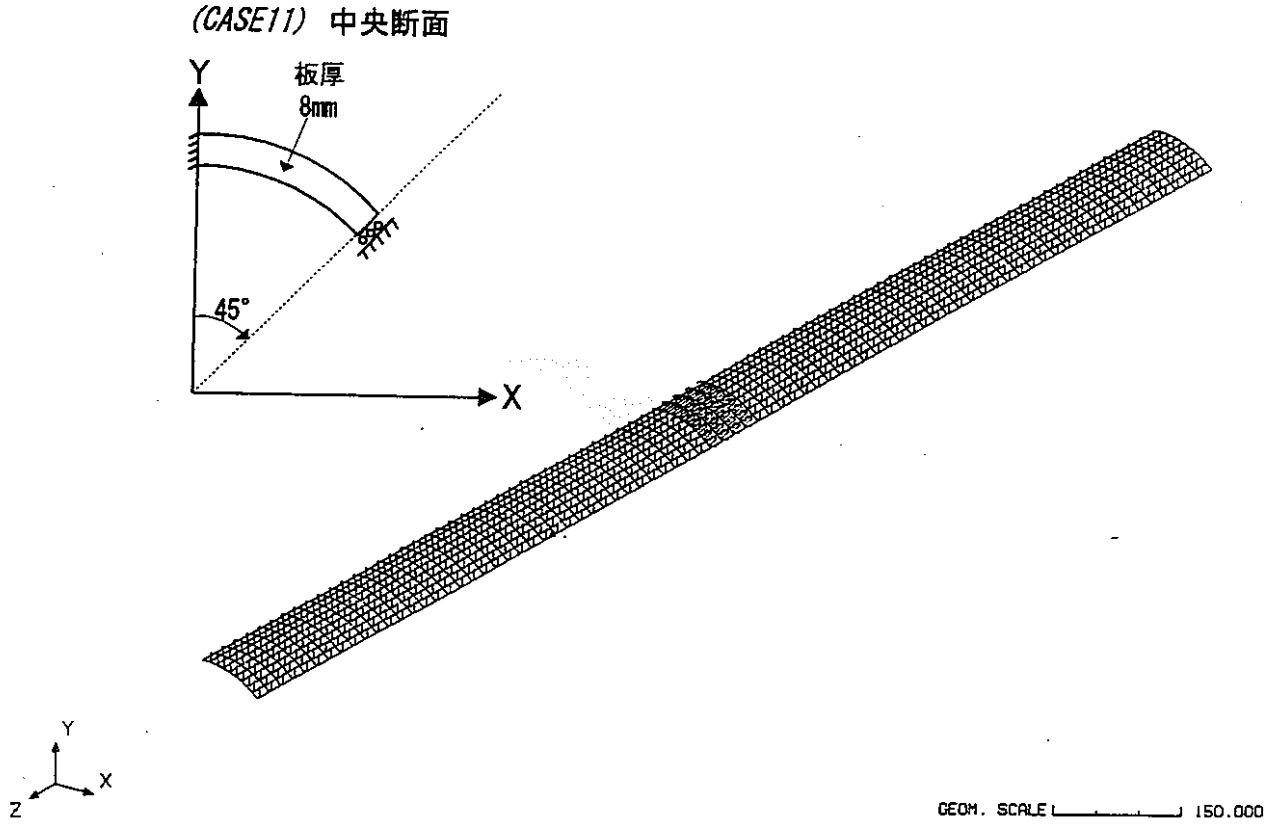


図 4-13　CASE11の中央断面の幾何特性図

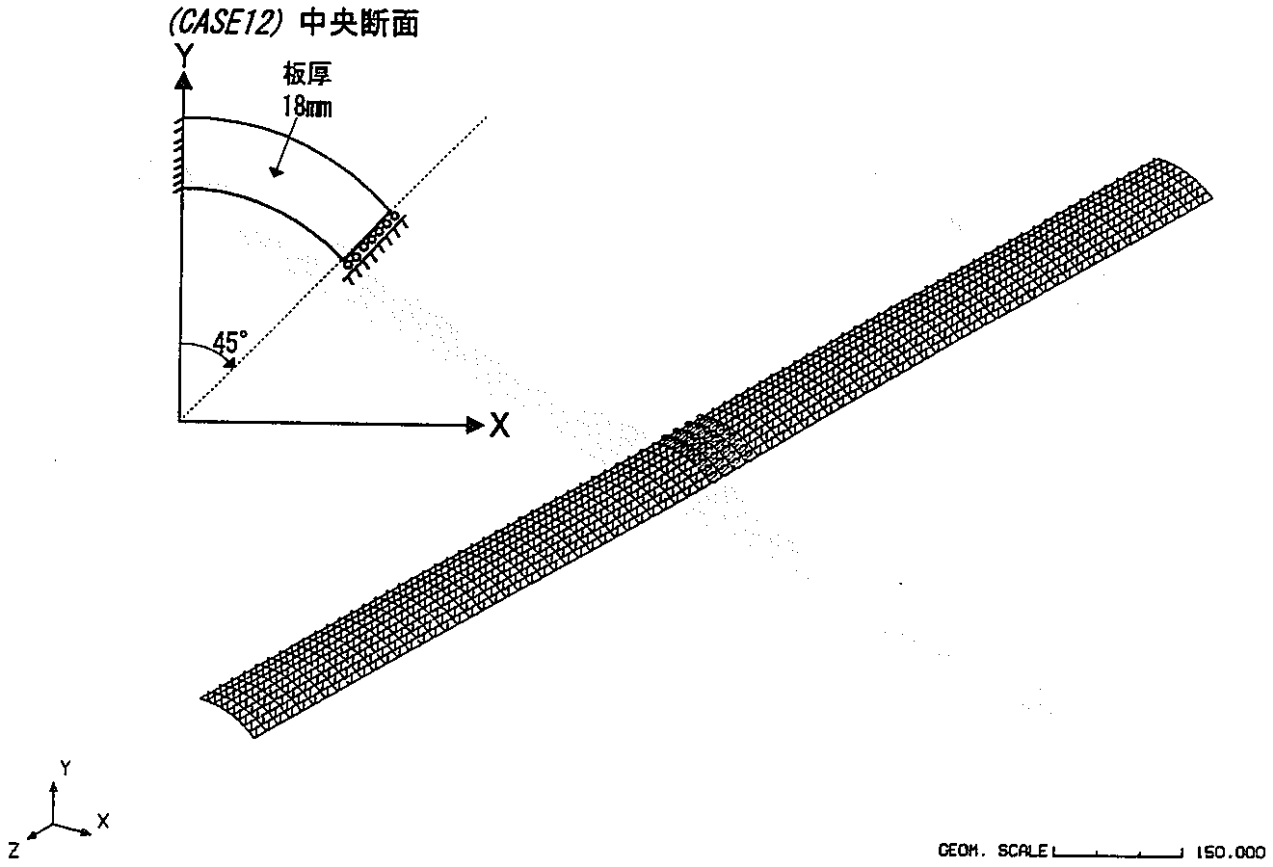


図 4-14　CASE12の中央断面の幾何特性図

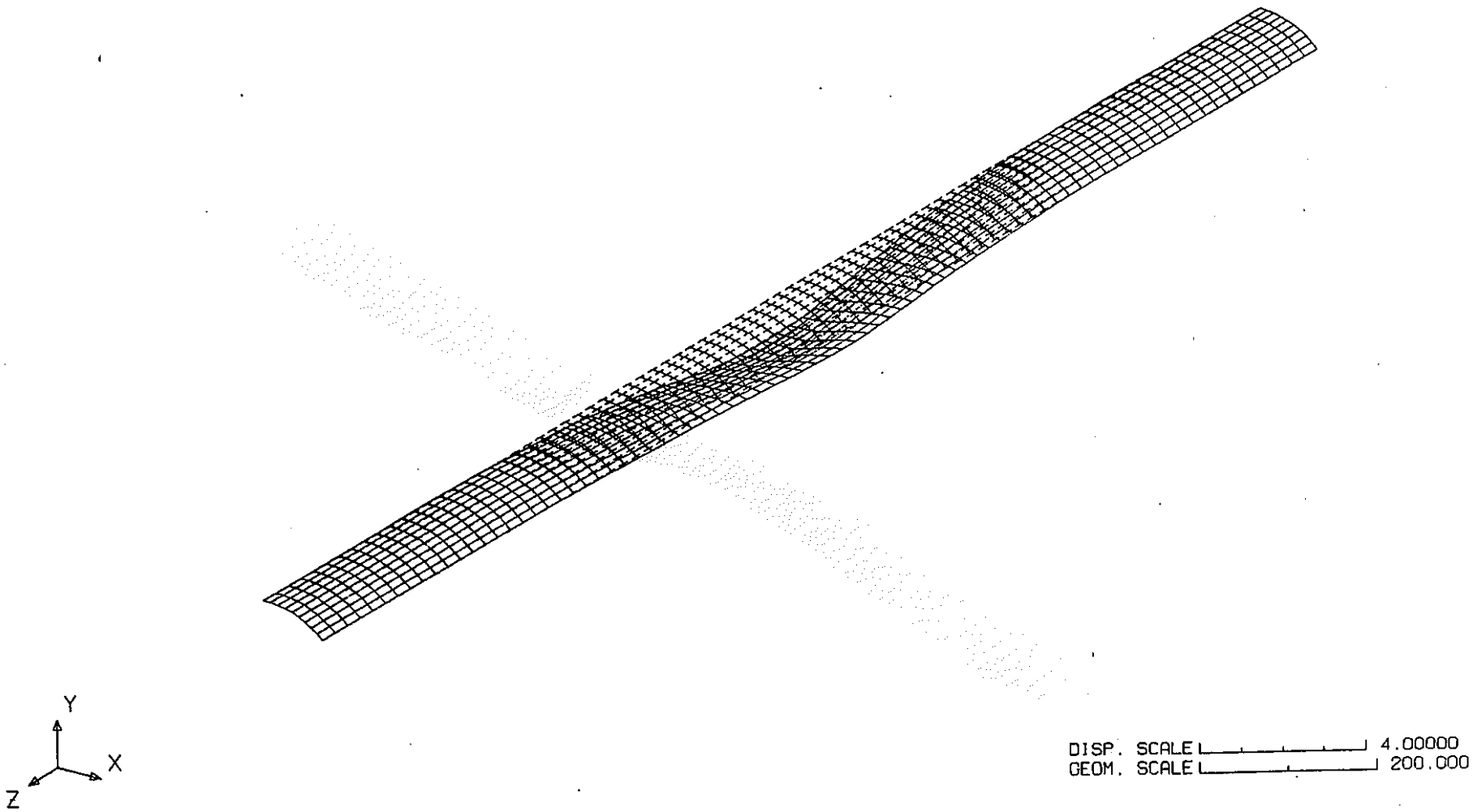


図 4-15　CASE9の変形図

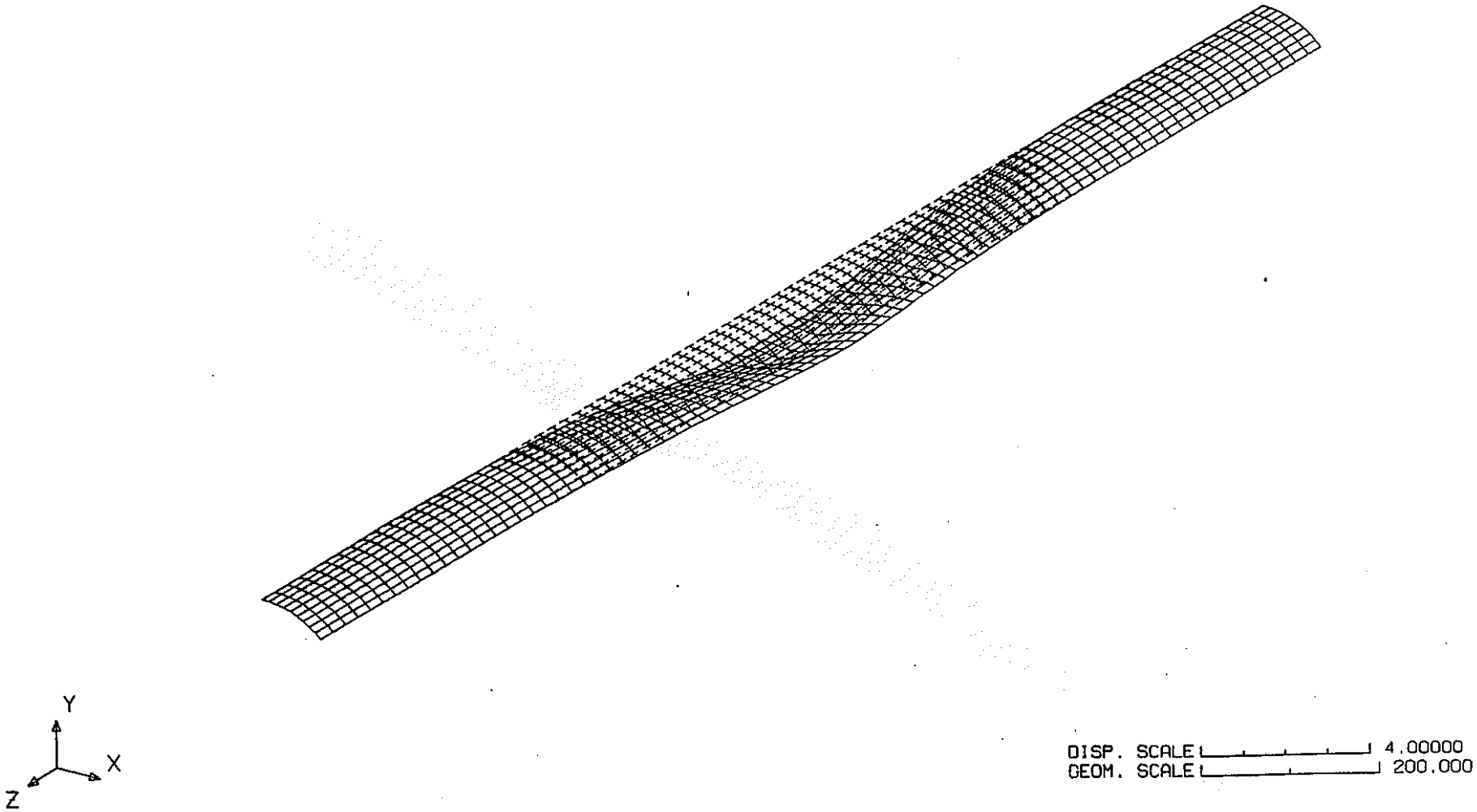


図 4-16 CASE10の変形図

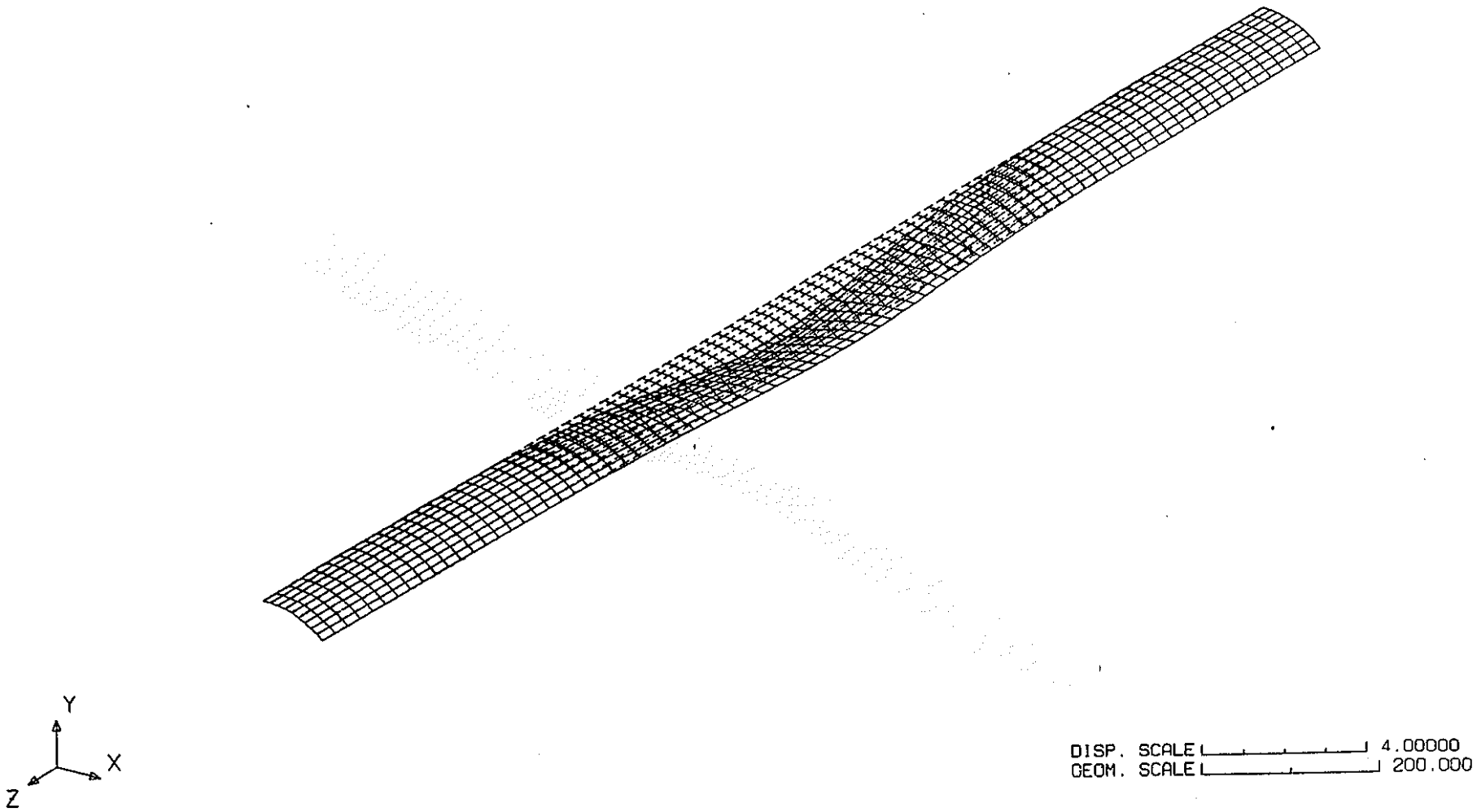


図 4-17　CASE11の変形図

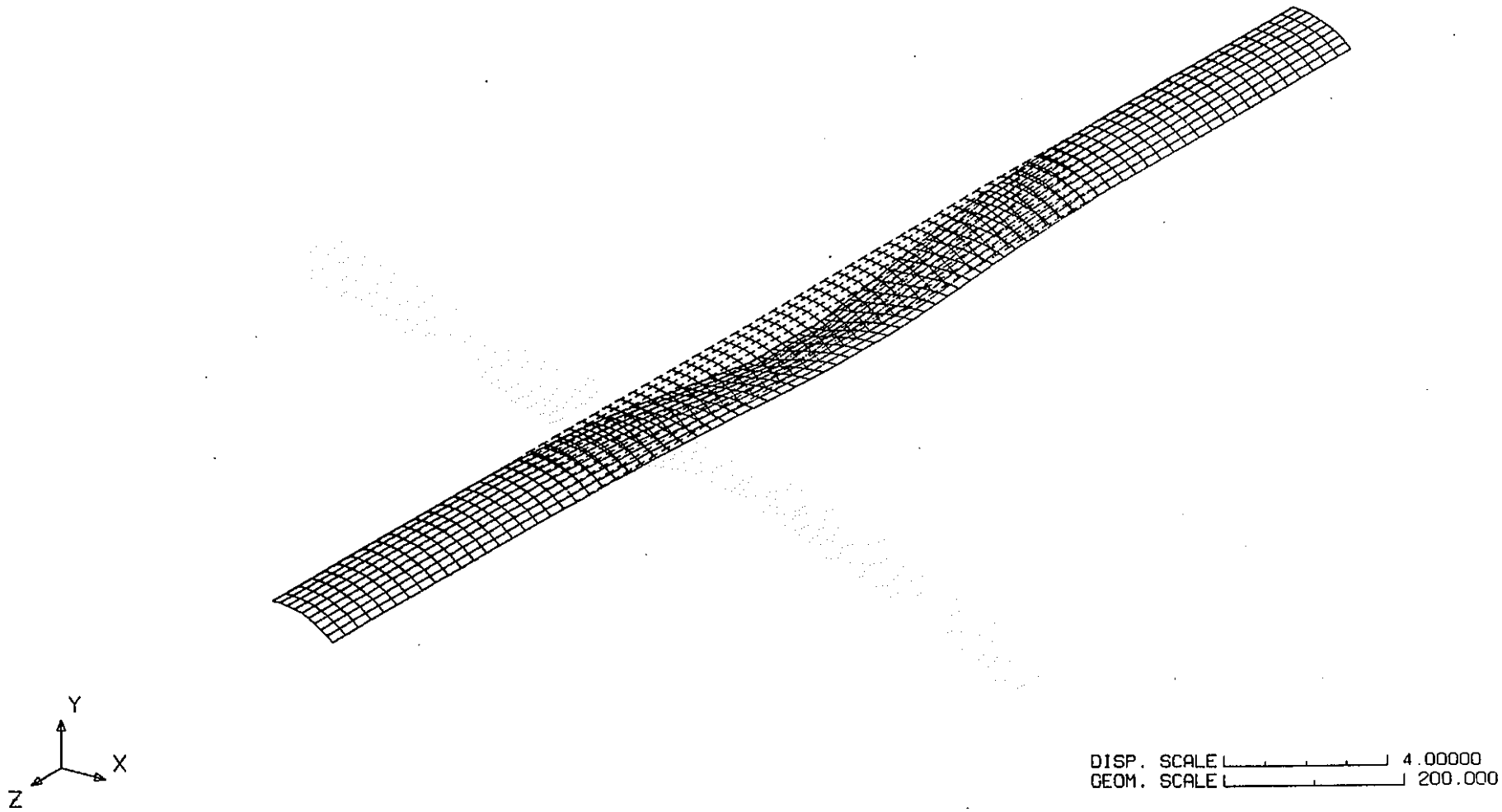


図 4-18　CASE12の変形図

5．今後の課題

試験体の構造決定までには原子炉構造側との取合い調整、試験計装との取合い調整、耐震強度の評価・確認、試験条件の明確化に基づく熱過渡強度評価・確認、製作・加工法等の検討及びモックアップによる試験体の圧損／バイパス流配分の確認等の諸種課題があるが、今回の検討に関連して、更に検討すべきあるいは明らかにしておくべき課題項目を以下に示す。

(1)試験体切り離し構造

１次容器内ナトリウム自由液面上のアルゴンガス空間上方のシール部および計装線コネクター部の冷却構造は構造的にも複雑であり、短い距離で大きな温度落差は構造強度的にも厳しい。必要な最小冷却度の評価に基づき構造の簡素化を図る必要がある。

そのために、今後の技術開発を視野に入れて電気･計装用のコネクターおよびカバーガスシール部のシールリングの耐熱性等の調査を継続することが重要である。

(2)試験後の放射線強度

試験後の引き抜きのための炉上部における作業時の被爆評価が必要である。その結果によっては遮蔽構造の検討あるいは切り離し構造の見直し検討もあり得る。

(3)真空断熱空間での予熱特性

ヒータの健全性、寿命評価の目的で簡易Ｒ＆Ｄの実施。ヒータ取り付け被加熱物／ヒータ自身／外周真空境界壁のそれぞれの表面温度分布、ヒータ出力等の計測値より、適正なヒータ配置、出力、寿命･健全性評価を可能とする。

(4)試験計装の具体化

今回の検討では試験計装とのインターフェイスは考えずに構造概念を展開してきた。実機ではこの取合い構造が大きな問題を含んでくると予想され、早い時期での試験計装の具体化が必要である。

6．まとめ

試験体ループについては、これまでに「炉内試験体の調査および構造強度計算」(1994 年度)、「炉内試験体の熱収支計算と成立性調査」(1995 年度)の検討を行ってきた。

今回の検討は、炉外の外付けＮａループ形式の試験体概念に基づく試験体切り離し構造及び外付き試験ループ全体の工学的成立性について実施した。検討結果をまとめると以下の様である。

（１）試験体の切り離し構造に関し、以下の４つの構造概念を検討した。

① １次容器一体型試験体

② １次容器切り離し型試験体

③ 仕切管上下切り離し型試験体

④ 燃料試験部切り離し型試験体

それぞれの試験体に共通の構造要素として、燃料破損時の一次バウンダリーに対する衝撃力緩和の観点から試験体内部にナトリウム自由液面とカバーガス空間を設定している。

検討の結果、一体型試験体に比較して取扱い長さが約半分(約６ m)で消耗部材（＝廃棄物）が大幅に低減出来る合理的試験体の構造の成立性を得た。

（２）上記の合理的構造の試験体を炉内に挿入、引き抜き出来る取扱い設備の概略構造検討と試験体の据付手順についての検討を行い、炉内構造物を扱う上では常識的な取扱い設備対応で据付が可能であることを把握した。

（３）外付け試験ループの系統としての工学的成立性について諸観点から検討を実施した。試験部で発生する熱を空気式熱交換器等で除熱冷却し、閉ループにてヒートバランスを保持する系統構成の Na ループは試験条件の実現性、安全性、設備の規模及び配置の成立性等の観点から実現は困難なものと判断された。それに代わるループ構成として MAKE UP タンク方式のループについて検討し、限定した一定時間内での試験条件の実現性、発生熱量の吸収性、設備の配置の簡素化（集中配置の可能性）等の観点から十分合理的で成立性あるものと判断された。

（4）長尺構造物の試験体の強度的成立性の要件として耐震強度があるが、その成立性判断の一つの目安として試験体の固有振動数の計算を実施した。１次容器／２次容器／外容器／試験孔をバネ剛性の支持点で連成させた計算を行い、支持点バネ定数が振動特性に大きく影響することが判明した。

耐震性の観点から固有振動数は２０ Hz 以上を確保したいが、このためには支持点のバネ定数は 5000 kg /mm 以上が必要である。支持点バネ定数が 10000 kg/mm あれば試験体の１次固有振動数は約２７ Hz を確保出来ることが解った。

謝辞

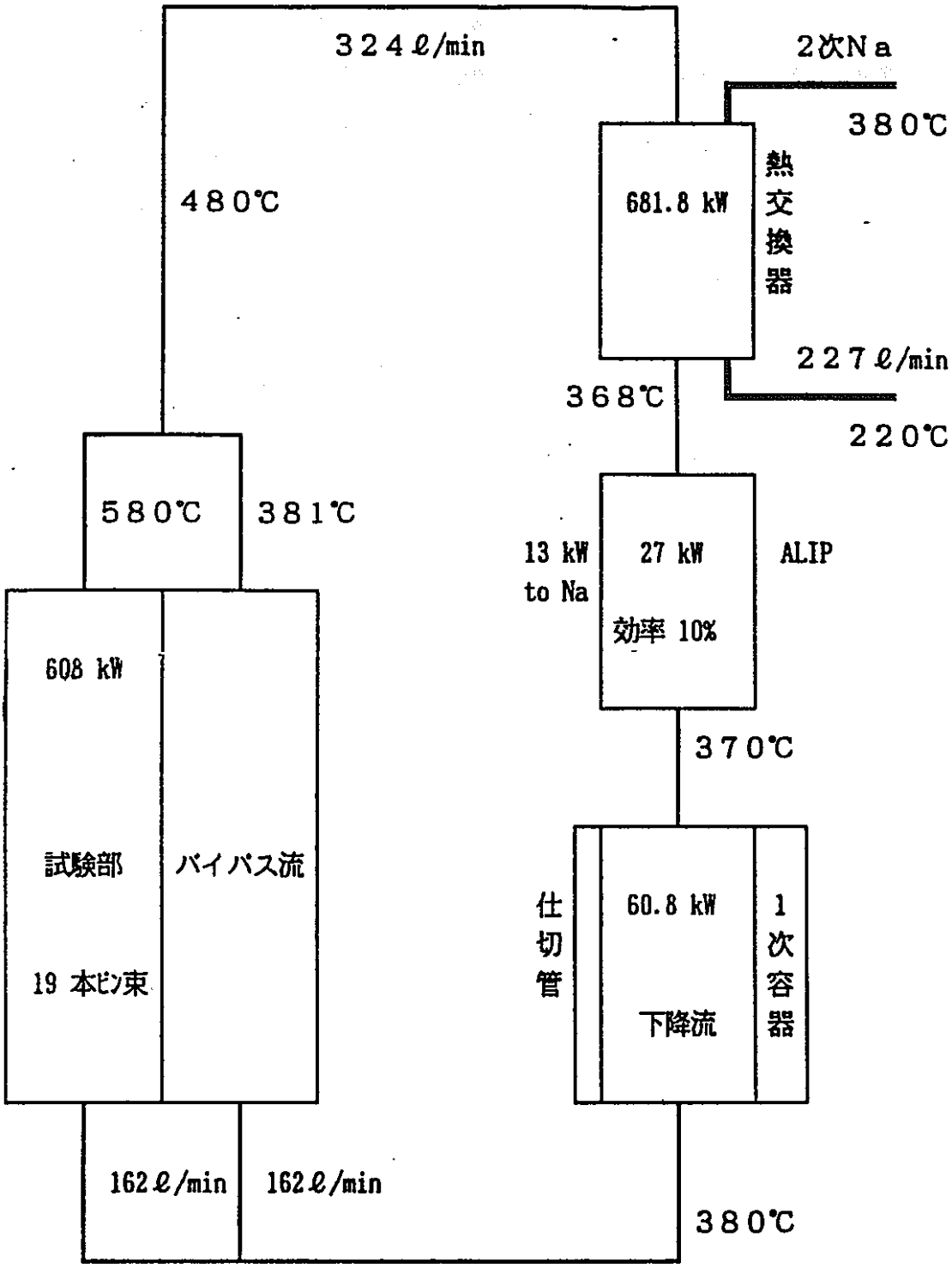
本報告書の作成に当たり、ご指導及び有益なご検討を頂いた事業団大洗工学センター基盤技術開発部リスク評価技術開発室、飛田副主研及び安全工学部機器・構造安全工学室、西浦研究員に謝意を表します。また、安全工学部プラント安全工学室、内山研究員からもいろいろな助言を頂きました。特に、安全工学部高速炉安全工学室の野中室長代理には、試験体の切り離し構造及び外付けナトリウムループ合理化検討に有益な助言を頂いたことに謝意を表します。

参考文献

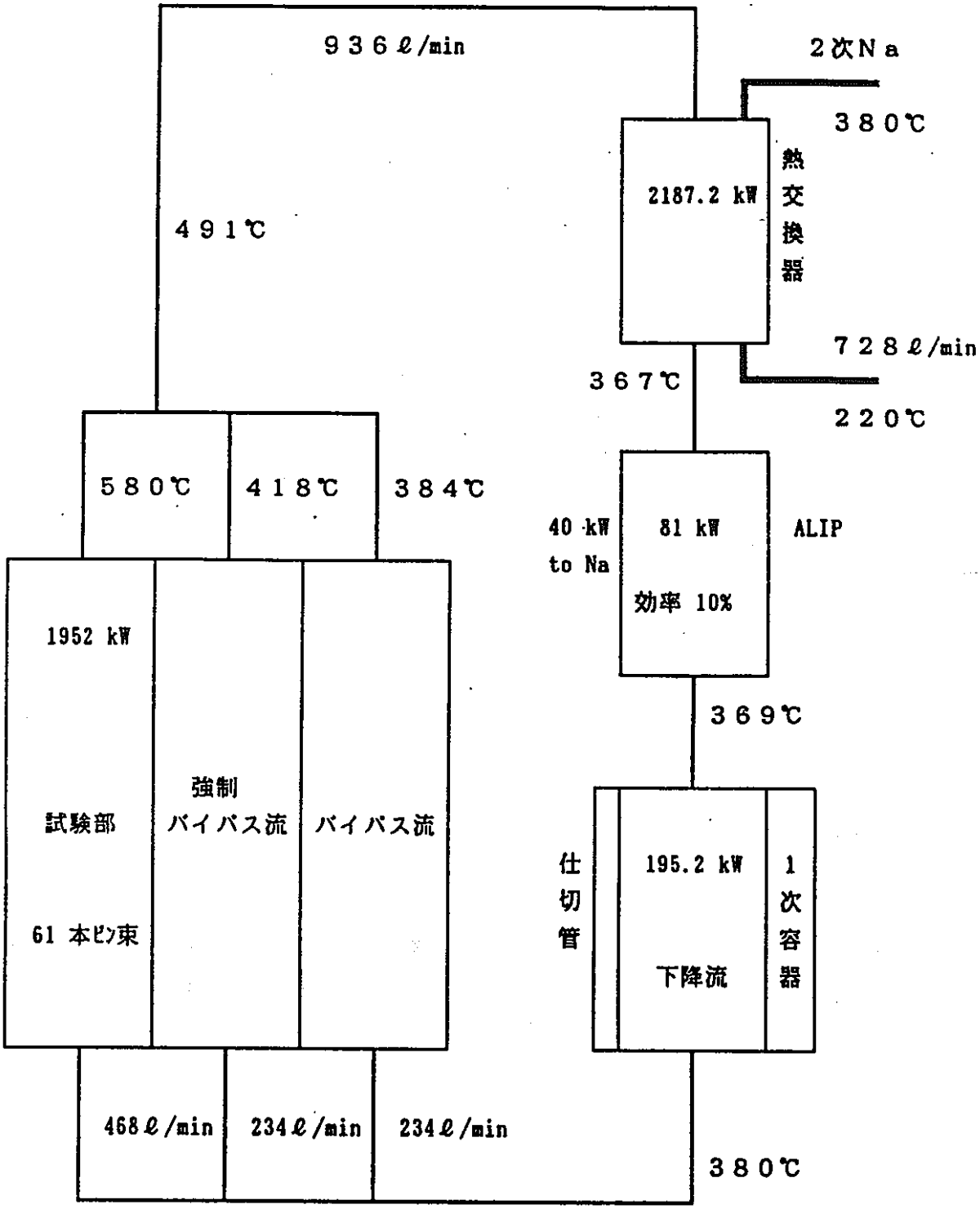
1. 長渡甲太郎, 下田貞之, 吉江伸二, 矢野和隆, PNC PJ9055 95-002, 高速炉安全性試験炉－炉内試験体の調査および構造強度計算－, (1995)
2. 長渡甲太郎, 吉江伸二, 矢野和隆, 高田孝, 前川勇, 下田貞之, PNC PJ9055 96-003, 高速炉安全性試験炉－炉内試験体の熱収支計算と成立性調査－, (1996)
3. 吉利照治, 下田貞之, 八木英司, 佐々木徹, M. K. ｻﾝﾀﾞｰｽ, J. A. ｸﾞﾘﾌｨｽ, R. ｱｯﾌﾟﾀﾞｲｸ, PNC SJ 213 79-05, 炉中ナトリウムループ関連機器概念の設定(Ⅱ)－, (1979)

（添付-1） 試験体の定格時熱収支

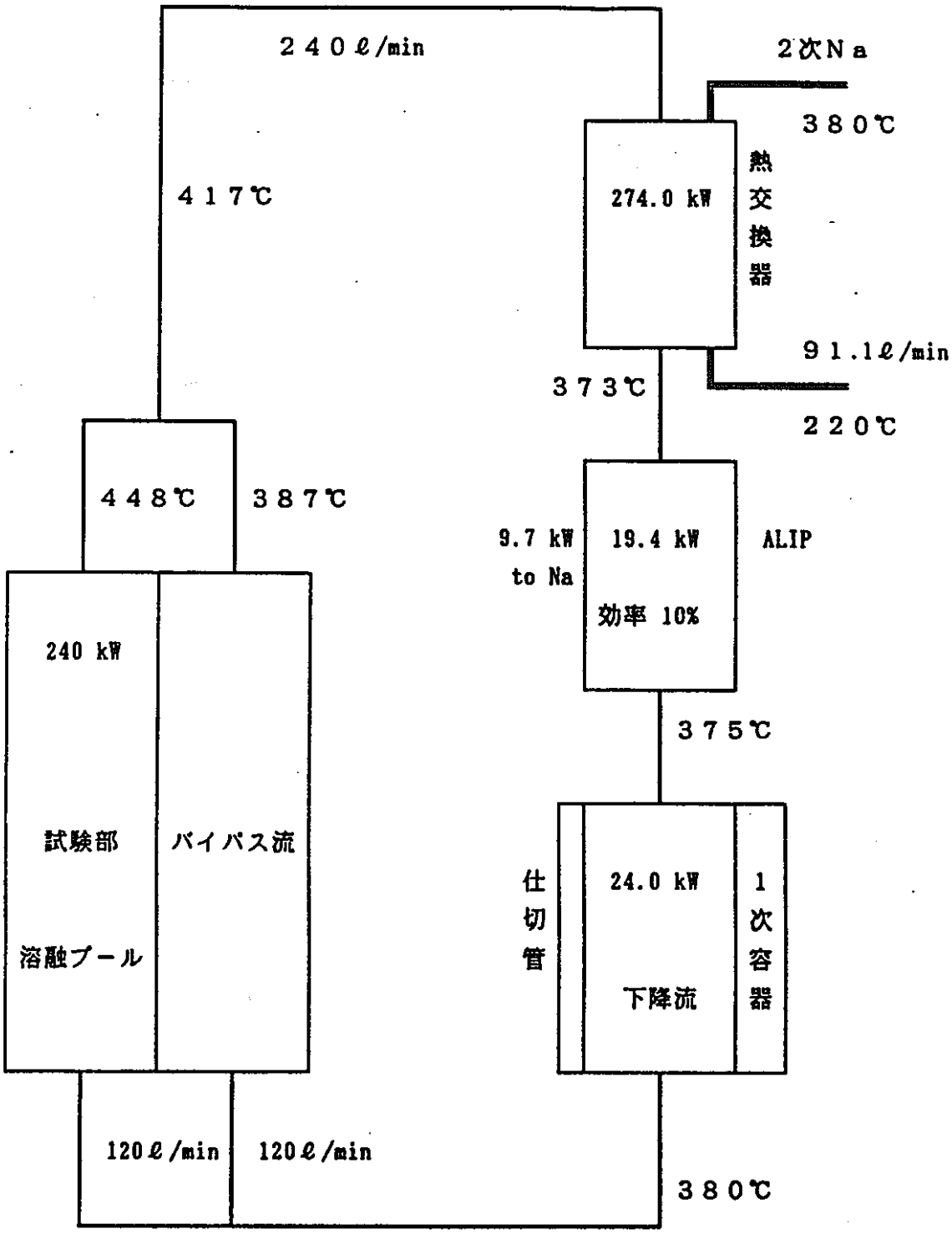
“平成７年度検討” から代表３種類の試験体の定格時熱収支を抜粋して示す。



① 標準試験体ループ１（１９本ピン束）の定格時熱収支

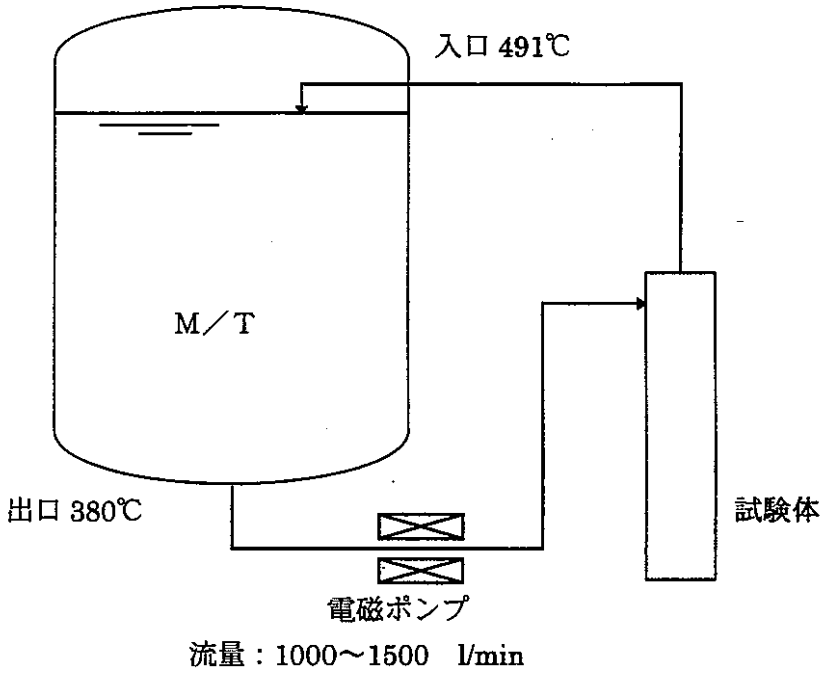


② 標準試験対ループ２（６１本ピン束）の定格時熱収支



③タイプＶ（定常保持型プール試験体）の沸騰プール維持時の熱収支

（添付－2） Makeup タンク内ナトリウム温度変化計算



計算条件

(1) タンク形状

① Makeup タンク 1 （縦置き円筒型）
寸法：φ 2.5 m × h 5.0 m
Na 保有量：15 m^3

② Makeup タンク 2（縦置き円筒型）
寸法：φ 3.0 m × h 3.0 m
Na 保有量：15 m^3

(2) タンク出入口温度
出口：380℃
入口：491℃

(3) タンク内 Na 初期温度
380℃

(4) 流量
1000 、1500 l /min（at 380℃）

(5) その他
タンク表面は、断熱と仮定する。タンクへ流入するナトリウムは、限りなく緩やかに流れ込むものと仮定する。

1.計算モデル

Make Up タンク内のナトリウム温度transient計算のために、本解析では以下に示す非定常１次元の対流－拡散方程式を用いた。

$$\frac{\partial T}{\partial t}+v\frac{\partial T}{\partial x}=a\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad \text{(式1)}$$

v：対流速度

a：温度伝導度

この式における初期条件、及び境界条件を以下に示す。

初期条件

$T=T_0$　　$x>0$、$t=0$

$T=T_1$　　$x\leqq 0$、$t=0$

境界条件

$T=T_0$　　$x\rightarrow\infty$

$T=T_1$　　$x\rightarrow -\infty$

この式では、平均温度（T_0+T_1）/2となる点は一定速度vで移動し、その点を中心として拡散現象が模擬されている。この式を解くと誤差関数erf(x)を用いて、タンク中のナトリウム温度過渡現象を以下のように示すことができる。

$$T(x,t)=\frac{T_1+T_0}{2}-\frac{T_1+T_0}{2}erf\left(\frac{x-at}{2\sqrt{vt}}\right) \qquad \text{(式2)}$$

2. 計算パラメータ

本解析では計算パラメータとしてタンク形状、及び流入流量を用いた。

タンク1：　　形状 ϕ 2.5m×h5.0m

Na保有量15m³（液面高さは3056mm）

タンク2：　　形状 ϕ 3.0m×h3.0m
Na保有量15m^3（液面高さは2122mm）

流入流量：1000、1500 l/min（at 380℃）

3.初期条件、及び物性値

初期条件として以下に記す値を用いた。

タンク出入口温度	出口温度（T_0）	380℃
	入口温度（T_i）	491℃
タンク内初期温度		380℃

物性値としては以下に示す値を用いた。

ナトリウム温度伝導度　　63.2(mm^2/sec) (at 700K)

4.計算結果

本解析では4ケースの計算を行った。

ケース1：タンク1、流入流量1000l/min：ナトリウム流入速度：3.40 (mm/sec)
ケース2：タンク1、流入流量1500l/min：ナトリウム流入速度：5.09 (mm/sec)
ケース3：タンク2、流入流量1000l/min：ナトリウム流入速度：2.36 (mm/sec)
ケース4：タンク2、流入流量1500l/min：ナトリウム流入速度：3.54 (mm/sec)

出口部分における温度変化を図1に示す。流入流量1000l/minの場合は、600秒近辺から温度上昇が始まり、1200秒程度で流体温度は490℃に到達する。流入流量1500l/minでは450秒近辺から温度上昇が始まり、700秒程度で流体温度は490℃に到達する。タンク1とタンク2の比較では断面積の大きいタンク2の方が液面高さが低いために若干温度上昇の立ち上がりが速い。

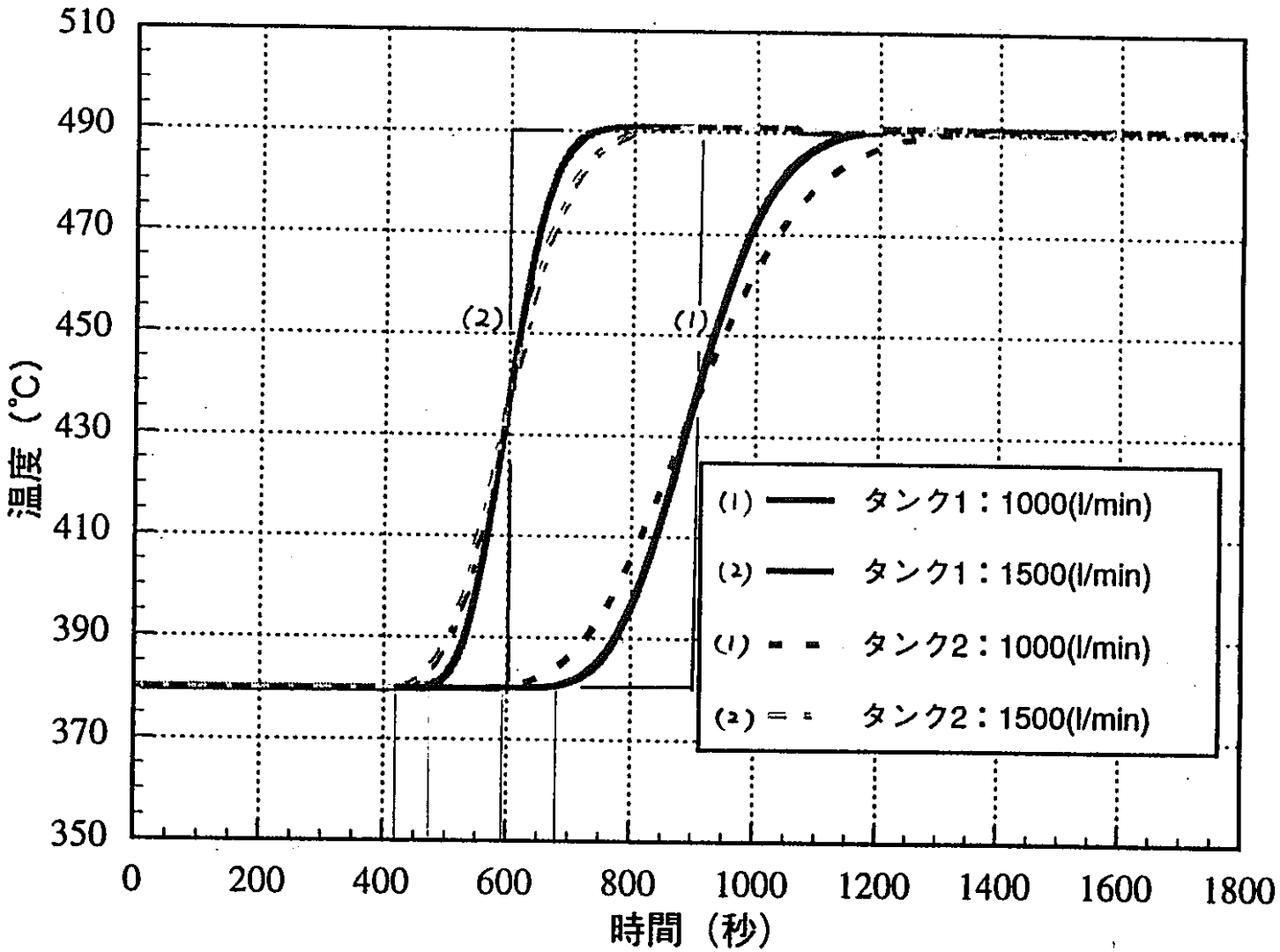


図1　出口位置におけるナトリウム温度変化

（添付－３）　試験体からの放散熱量

1. 放散熱量の概算（2 次容器温度と放散熱量の関係）

1.1 検討条件

(1)予熱温度　200 ℃以上　（1 次容器）

(2)重水温度　40 ℃

(3)計算式（本計算では計算簡略化のため、管およびガス、冷媒等の熱伝導は瞬時に伝導するものと仮定する。また、熱伝導抵抗（R）の計算においては、管等の熱伝導を考慮しない。）

・放散熱量　$Q=2\cdot\pi\cdot(t_1-t_2)/R$

・熱伝導抵抗　$R=1/(\alpha_1\cdot r_1)+\cdots\cdots+1/(\alpha_n\cdot r_n)$

Q：管表面より管長 1 mにつき 1 時間当たりに放散する熱量（kcal/mh）

R：管表面より管長 1 m当たりの熱伝導抵抗（mh℃/kcal）

t_1：内部温度（℃）

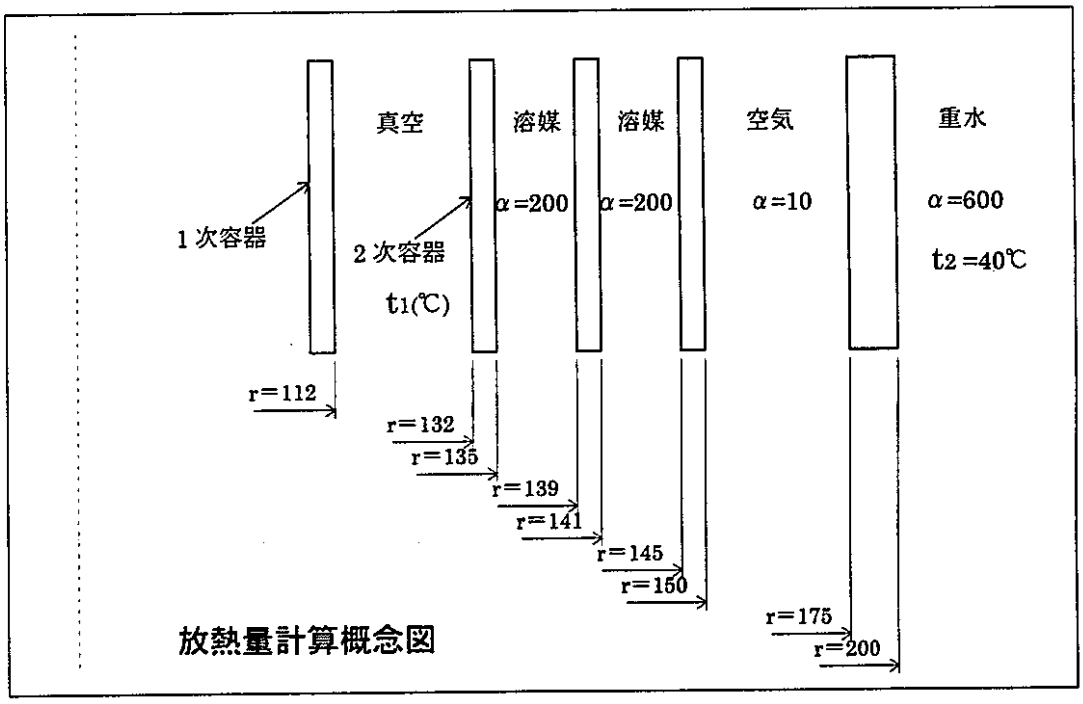
t_2：外部温度（℃）

α_1：最内層での金属壁への表面熱伝達率（kcal/m²℃）

α_n：最外層での金属壁への表面熱伝達率（kcal/m²℃）

r_1：熱伝達部半径（m）

r_n：熱伝達部半径（m）



放熱量計算概念図

1.2 計 算

(1)伝熱抵抗 R

$$R = 1/(200\times0.135)+1/(200\times0.139)+1/(200\times0.141)+1/(200\times0.145)+1/(10\times0.150)+1/(10\times0.175)+1/(600\times0.2)$$

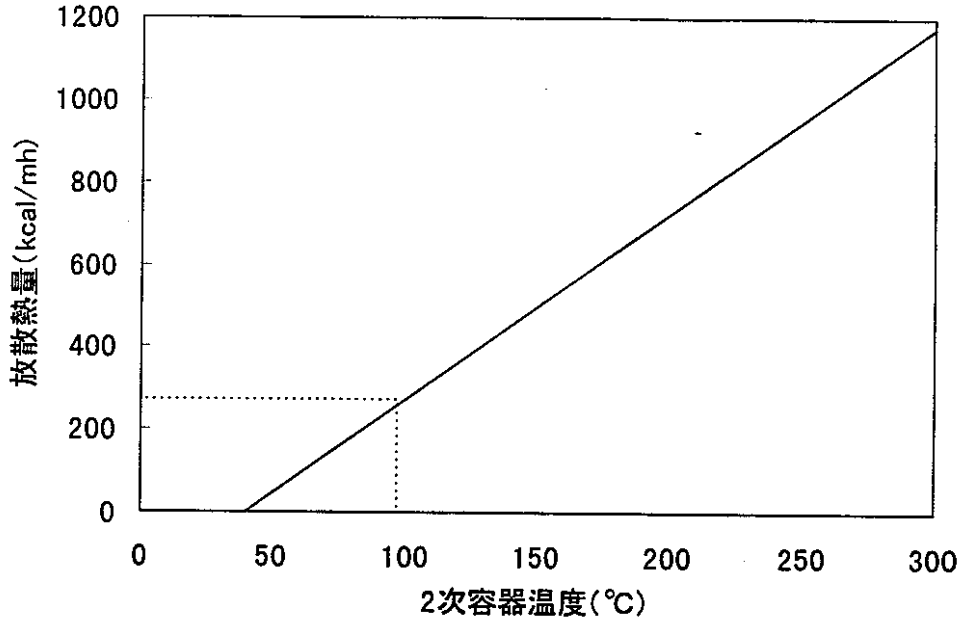
$$= 1.389 \quad (\mathrm{mh℃/kcal})$$

(2)放散熱量 Q

下 式に示すように、重水への放散熱量（Q）は2次容器の温度（t_2）の 関数として求められる。

$$Q = 2\pi\times(t_2-40)/1.389$$

2次容器温度と放散熱量の関係は、以下のグラフのようになる。



2. 1次容器温度（1次容器外表面温度と2次容器温度の関係）

2.1 計算

1次容器温度は、1次容器から2次容器への輻射熱伝達量と試験体から重水への放散熱量が等しくなる条件を解くことにより求めることができる。

(1)計算式

1次容器から2次容器への輻射熱伝達量は下式より求められる。

$q = A_1 \times \sigma / (1/\varepsilon_1 + A_1/A_2 \times (1/\varepsilon_2 - 1)) \times (T_1^4 - T_2^4)$

q： 1次容器から2次容器への 1 m当たりの輻射熱伝達量 (kcal/mh)

A_1： 1次容器の1m当たりの外表面積 (m^2)　0.7037

A_2： 2次容器の1m当たりの内表面積 (m^2)　0.8294

T_1： 1次容器の外表面温度 (K)

T_2： 2次容器の内表面温度 (K)

σ： 表面吸収率　4.88×10^{-8}

ε_1： 1次容器表面輻射率　0.35

ε_2： 2次容器表面輻射率　0.35

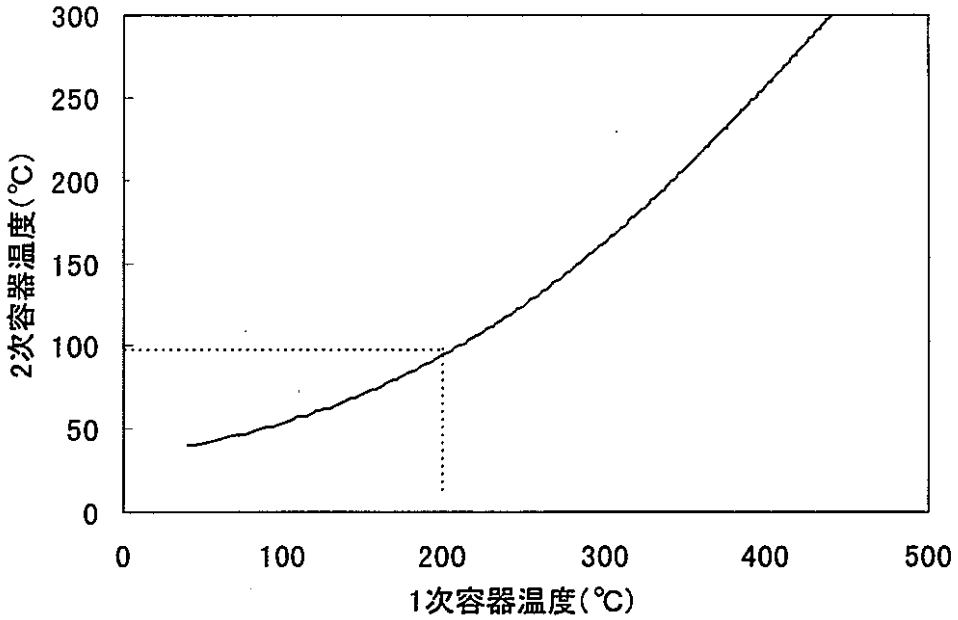
(2) 計算

上式より、1次容器の外表面温度 (T_1) を求めると下式のようになる。

$T_1 = (q \times (1/\varepsilon_1 + A_1/A_2 \times (1/\varepsilon_2 - 1)) / A_1 / \sigma - T_2^4)^{(1/4)}$

qにQ ($=2\pi \times (t_2 - 40) / 1.389$、$t_2 = T_2$) を代入し、1次容器温度と2次容器温度の関係をグラフに表すと以下のとおりとなる。

1次容器温度と2次容器温度の関係



3.　1次容器温度が200℃のときの2次容器温度と放散熱量

1.および2.のグラフより、1次容器温度が200℃のときの2次容器温度（T_2）とそのときの放散熱量（Q）を求めると、

$$Q = 2\pi \times (95-40) / 1.389$$
$$= 249 \quad (\mathrm{kcal/mh})$$
$$\fallingdotseq 0.29 \quad (\mathrm{kW/m}) \qquad [\ 249/860 = 0.29\ ]$$

$$T_1 = ((q \times (1/\varepsilon_1 + A_1/A_2 \times (1/\varepsilon_2 - 1)) / A_1/\sigma) - T_2^4)^{(1/4)}$$
$$= (249 \times (1/0.35 + 0.7037/0.8294 \times (1/0.35 - 1)) / 0.7037 / 4.88 \times 10^{-8} + 368.15^4)^{(1/4)}$$
$$= 474 \ (\mathrm{K})$$
$$\fallingdotseq 201 \ (℃)$$

となる。したがって、試験体予熱ヒータの必要熱容量は1mあたり最低300kW程度と考えられる。

（添付－4） 試験体及びループの圧損(EMP 必要揚程)

電磁ポンプの性能確定に資するため、本ループの代表的部位の圧力損失を計算し電磁ポンプの必要揚程を求める。計算対象箇所は、試験体および1次 Na 系配管とする。試験体は、最も圧力損失抵抗が高くなると考えられる 61 ピン束試験体の「ピン束部」と「試験体 Na 出入口配管」に着目して計算する。

1. 試験体 61 ピン束部の圧力損失抵抗

(1) 検討条件

管外抵抗は以下の計算式で求められる。

（伝熱工学資料: 管外流体が管に沿って流れる場合のシェルアンドチューブ式熱交換器の流体圧力損失抵抗より。）

$\Delta P = 0.046 \times Re^{-0.2} \times 4 \times L / De \times \gamma \times \omega^2 / (2 \cdot g)$

ΔP : 抵抗（圧損） (kg/m^2)

Re : レイノルズ数 $\omega \times D / \nu$

L : 管長さ（m） 2.5

De : 管外通路の相当直径（m）

$D_0 \times (1.188 \cdot R^2 - 1) / (1 + 1.09 \cdot R / \sqrt{Z})$ or $4 \times F / U$

F : 流路面積 (m^2)

U : 流路ぬれぶち長さ

γ : 比重量 (kg/m^3) 833 at 480℃

ω : 流速（m/s） 6.62……H8 年度検討より

g : 重力加速度 (m^2/s) 9.81

D : 管直径（m） レイノルズ数を求めるときは De を使用

ν : 動粘性係数 (m^2/s) 0.346×10^{-6}

D_0 : ピン直径（m） 7.5×10^{-3}……H8 年度検討より

p : ピンピッチ（m） 8.5×10^{-3}……H8 年度検討より

R : $p = R \cdot D_0$ $R = 8.5 / 7.5 = 1.133$

Z : ピンの数 61

(2) 圧力損失の計算

圧力損失計算は、「伝熱工学資料に記載の De、Re の求め方にしたがって計

算する方法」と「H8 年度報告書に記載の De を流用して計算する方法」の 2 例について行う。

① 伝熱工学資料に記載の De、Re の求め方にしたがって計算

$De = 7.5\times10^{-3}\times(1.188\times1.33^2-1)/(1+1.09\times1.133/\sqrt{61})$

$=3.4\times10^{-3}$ (m)

$Re = 6.62\times3.4\times10^{-3}/(0.346\times10^{-6})$

$=65052$

$\Delta P = 0.046\times65052^{-0.2}\times4\times2.5/0.0034\times833\times6.62^2/2/9.81$

$=27433.9$ (kg/m²)

$\fallingdotseq 2.7$ (kg/cm²)

② H8 年度報告書に基づいて計算（H8 年度報告書、P92 より）

$De=3.166\times10^{-3}$ (m)

$Re=60570$

$\Delta P = 0.046\times60570^{-0.2}\times4\times2.5/0.003166\times833\times6.62^2/2/9.81$

$=29885$ (kg/m²)

$\fallingdotseq 3.0$ (kg/cm²)

③ 計算結果

いずれの方法においても圧力損失抵抗の計算結果に大差はなく、61 ピン束試験体のピンバンドル部の圧力損失抵抗は、$\Delta P_1 \fallingdotseq 3.0$ (kg/cm²) 程度となると考えられる。

2. 試験体出入口配管の圧力損失抵抗

(1) 検討条件

1 次系 Na 配管は、3B 程度を想定しているが、試験体近くの Na 出入口配管は試験孔の大きさの制約があるため、1-1/2B（φ 48.6mm×t3.0mm）配管を出入口それぞれに 2 本づつ分配して設置するものとする。また配管は、熱膨張の影響緩和のため 1 次容器のまわりを螺旋状に巻くものとし、その巻数は 2 巻きと仮定して圧力損失抵抗を求める。

管内圧力損失抵抗は、以下の計算式で求めることができる。

（管路・ダクトの流体抵抗：気体・液体の一般の流れ、直管の損失より。）

$\Delta P = (\lambda \times (L/Di) + \zeta) \times \gamma \times \omega^2 / (2 \cdot g)$

ΔP：抵抗（圧損）（kg/m²）

λ：管摩擦係数　0.0165　（ムーディー線図より　Re6.74×10⁵）

L：管長さ（m）　10　（入口部 5m、出口部 5m）

Di：管内径（m）0.0426

ζ：損失係数　1.5　（急拡大 1.0、急縮小 0.44　各 1 個所）

γ：比重量（kg/m³）　833 at 480℃

ω：流速（m/s）　5.47

(2)　圧力損失の計算

①　流速　ω

$\omega = 0.936/60/(0.0426^2 \times \pi/4 \times 2)$

$= 5.47$（m/s）

②　配管長　L　（らせん状部・出入口）

$L = (\sqrt{((0.4 \times \pi)^2 + 2.15^2)}) \times 2 \times 2$

$= 10$（m）

③　レイノルズ数　$Re = \omega \times Di / \nu$

$Re = 5.47 \times 0.0426 / (0.346 \times 10^{-6})$

$= 673843$

④　圧力損失の計算

$\Delta P = (0.0165 \times 10 / 0.0426 + 1.5) \times 833 \times 5.473^2 / 2 / 9.81$

$= 6833$（kg/m²）

$\fallingdotseq 0.7$（kg/cm²）

⑤　計算結果

61 ピン束試験体の螺旋状出入口配管の圧力損失抵抗は、$\Delta P_2 \fallingdotseq 0.7$（kg/cm²）程度となると考えられる。

3.　1 次系配管ループの圧力損失抵抗

(1)　検討条件

1 次系 Na 配管は、3B 程度を想定している。

管内抵抗は、以下の計算式で求めることができる。

（管路・ダクトの流体抵抗： 気体・液体の一般の流れ、直管の損失より。）

$\Delta P = (\lambda \times (L/Di) + \zeta) \times \gamma \times \omega^2 / (2 \cdot g)$

ΔP：抵抗（圧損）（kg/m^2）

λ：管摩擦係数　0.0125　（ムーディー線図より　$Re 7.08 \times 10^5$）

L：管長さ（m）　80　（配置図より概算）

Di：管内径（m）0.0811

ζ：損失係数　19　（急拡大 1.0、急縮小 0.44　各 1 個所
弁 2.5　7 台）

γ：比重量（kg/m^3）　833 at 480℃

ω：流速（m/s）　3.02

(2)　圧力損失の計算

①　流速　ω

$\omega = 0.936 / 60 / (0.0811^2 \times \pi / 4)$

$= 3.02$（m/s）

②　レイノルズ数　$Re = \omega \times Di / \nu$

$Re = 3.02 \times 0.0811 / (0.346 \times 10^{-6})$

$= 707867$

③　圧力損失の計算

$\Delta P = (0.0125 \times 80 / 0.0811 + 19) \times 833 \times 3.02^2 / 2 / 9.81$

$= 12131$（kg/m^2）

$\fallingdotseq 1.2$（kg/cm^2）

④　計算結果

1 次系配管ループの圧力損失抵抗は、3.③の計算結果にフィルタ部の圧力損失（$0.2 kg/cm^2$）を加え、$\Delta P_3 \fallingdotseq 1.4$（$kg/cm^2$）程度となると考えられる。

4.　電磁ポンプに必要とされる能力

本装置の電磁ポンプに必要とされる揚程は、上記 1.、2.および 3.の計算結果

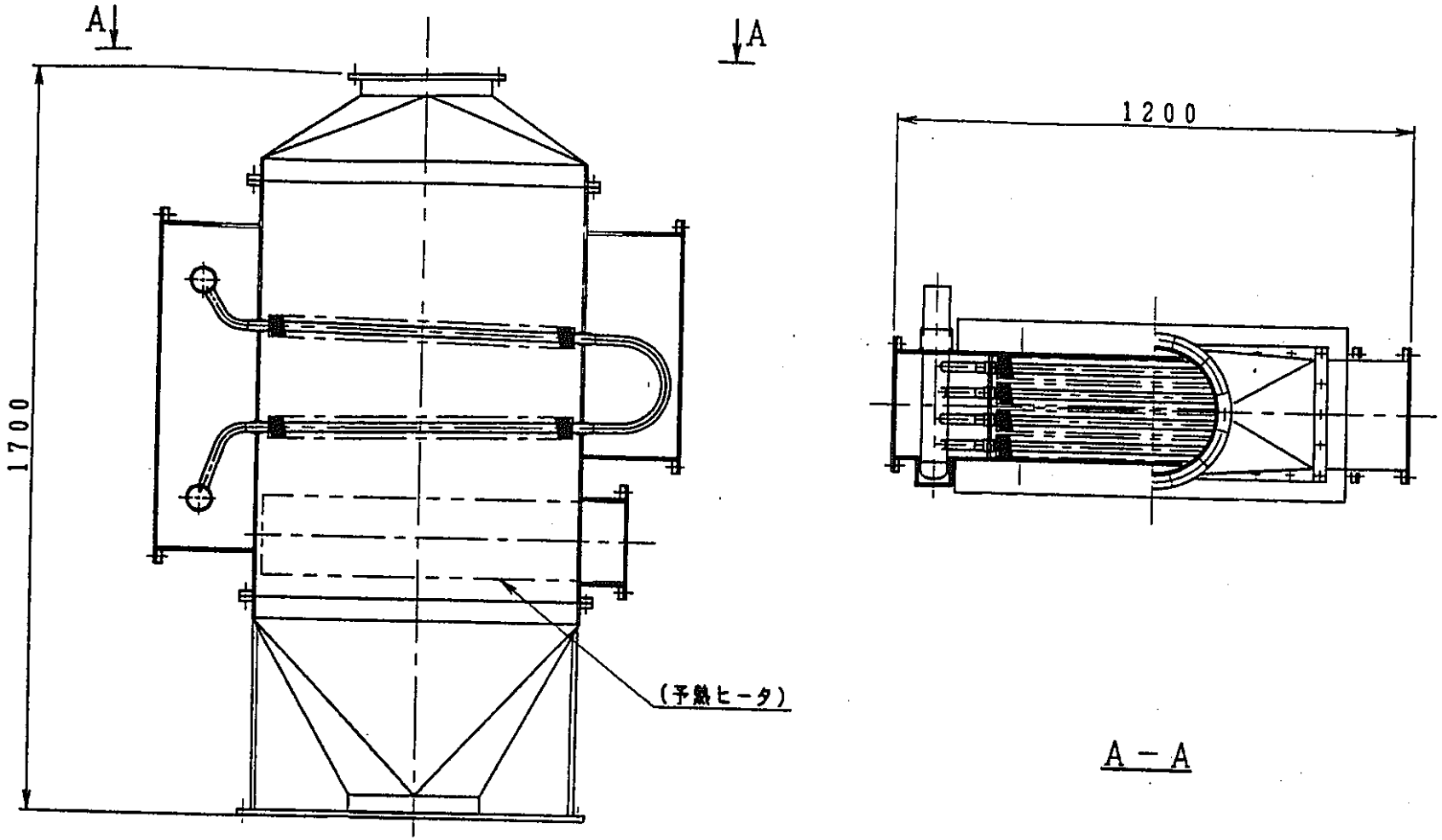
にループ高低差によるヘッド差（約6m、ΔP_4 ≒0.5（kg/cm²） at480℃）を加えたものとなる。

$$\Delta P_{pump} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4$$
$$= 3.0 + 0.7 + 1.4 + 0.5$$
$$= 5.6 \quad (kg/cm^2)$$

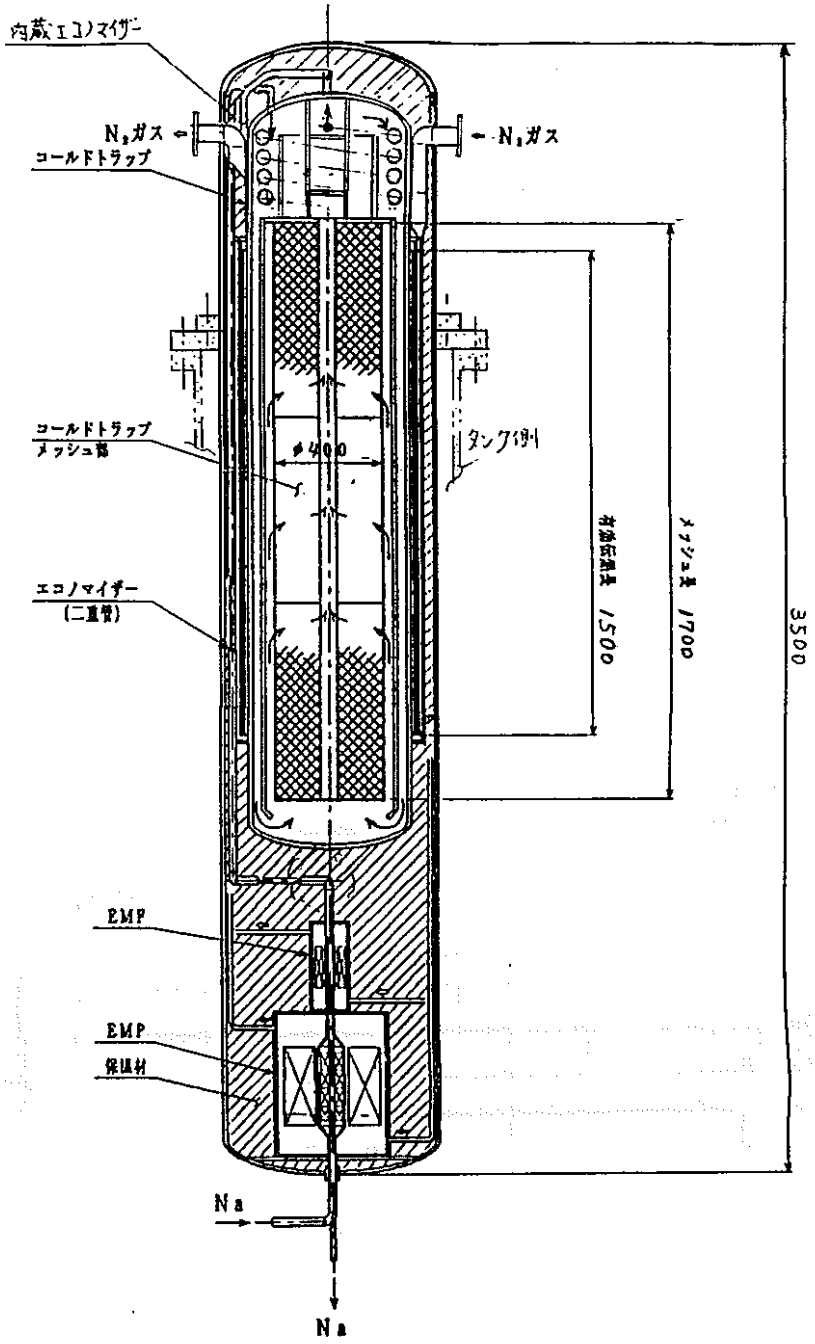
電磁ポンプに求められる能力は最低でも「流量 ： 60（m³/h）」「揚程 ： 70（m-Na）」以上は必要となる。

したがって、本装置の配置の検討にあたっては、以下に示す電磁ポンプを2台直列に使用するものとして検討する。

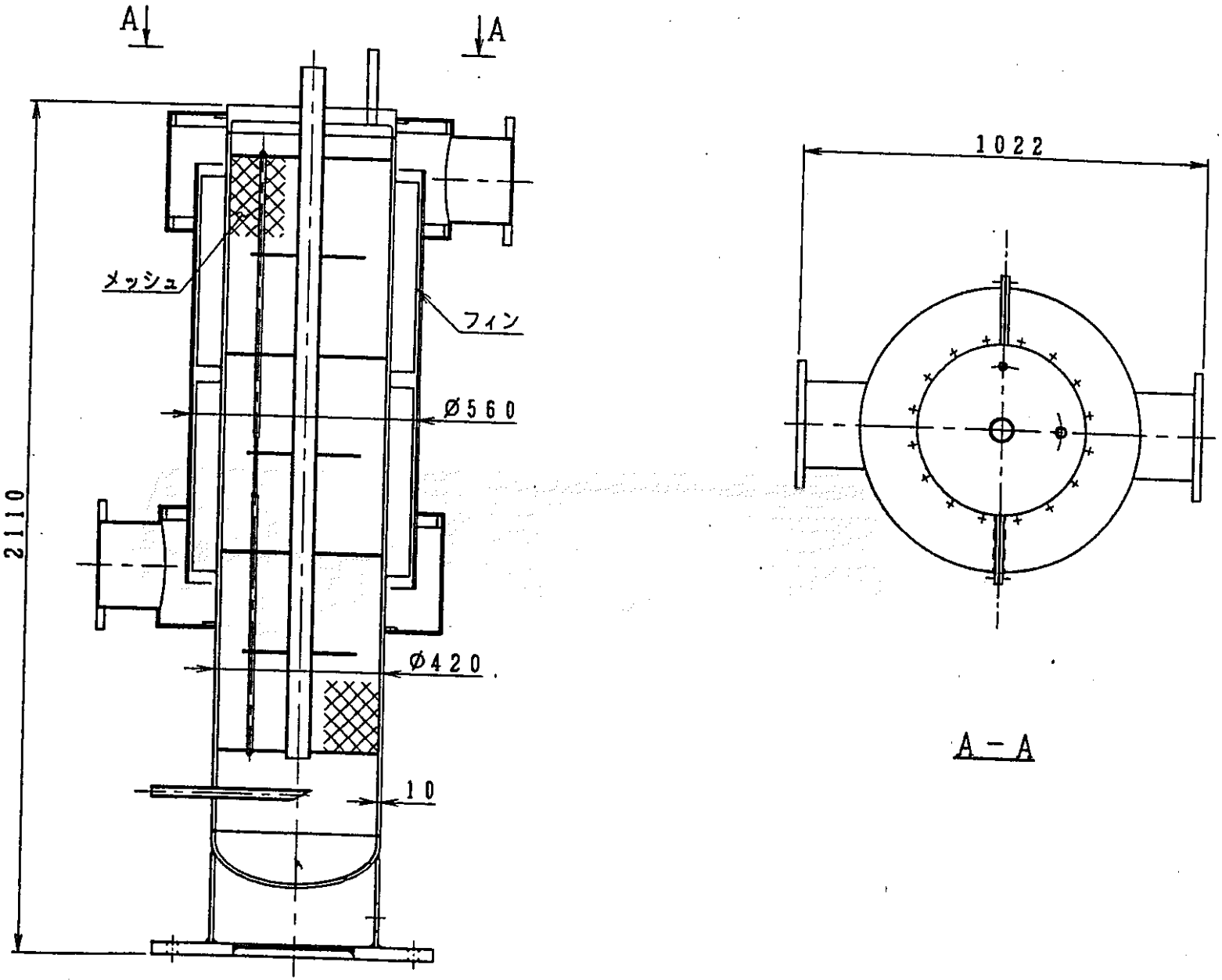
配管サイズ	： 3B（φ 89.1mm）
概略外形寸法	： 600×600×2000（mm）
流量	： 60 m³/h
揚程	： 35 m-Na



空気冷却器構造図



タンク内蔵型コールドトラップ構造図



外置き型コールドトラップ構造図