

550kV正立内部冷却形変流器

550kV Current Transformer

At Hitachi, Ltd. 550 kV current transformers using oil circulation have been completed recently for delivery to Hokusetsu Sub-station and Keihoku Substation, Kansai Electric Power Co. In developing this large capacity current transformer a 287.5 kV model was first designed and trially manufactured whereby to study its temperature rise, vibration, di-electric characteristics, transient characteristics, etc., and these data were used in the design of the same 550 kV units. The article introduces their outline and test results obtained in the factory tests.

石上維宏* Masahiro Ishigami

佐川富芳* Tomiyoshi Sagawa

田口和夫* Kazuo Taguchi

1 緒 言

550kV変流器は、空気しゃ断器(ABB)と組み合わされるがい子形変流器と、タンク形ガスしゃ断器(GCB)または密閉ガス絶縁開閉装置(GSS)と組み合わされるブッシング形変流器とに大別できる。ここでは、がい子形変流器の構造、冷却特性、絶縁特性、耐震特性および過渡誤差特性につき述べる。日立製作所は国内他社に先がけ昭和37年正立形定格電流1,200A変流器を試作完成し(図1)、引き続き大電流化に伴い昭和43年倒立形(棒形)3,000A変流器を完成した。これは昭和45年カナダBC州水利電力庁(BRITISH COLUMBIA HYDRO AND POWER AUTHORITY)に納入運転中である(図2)⁽¹⁾。その後、国内500kV送電において耐震、耐塩害の点より正立形4,000A変流器の要求が強まり、絶縁油が一次導体内を循環する内部冷却方式を開発した。

2 各種構造の比較

変流器は正立形、倒立形、カスケード形の3種類の構造に分類される。正立形には、表1の単純な正立形と強制的に油を循環させ冷却する正立強制冷却形、一次導体内の油温に絶縁温度差をつけて絶縁油を循環させる正立内部冷却形とに分類される。カスケード形は正立カスケード形とその変形である分流形とに分類される。これらを比較すると、倒立形は温度上昇の点から大電流に適しているが、頭部重量が重くなるため耐震強度上ステーがい子が必要となり、据付面積が大となる。カスケード形は、誤差要素が二重となり、過渡誤差特性が低下する。これらの点では正立形が有利であるが、一次導体主要部が主絶縁にておおわれているので、温度上昇が問題となる。今回これを導体内の絶縁油を循環させることにより解決し、正立内部冷却形を開発した。正立内部冷却形は、耐震特性、過渡誤差特性にもすぐれ、大電流変流器に最適の構造である。表1は、上記各構造を(1)過渡特性、(2)耐塩害特性、(3)冷却特性、(4)耐震特性、(5)据付保守の実用性などの点より比較した結果を示したものである。

3 内部冷却形変流器の原理

図3に示すように、U字状の金属管から成る一次導体の両脚の発生損失をたとえば材質、断面形状あるいは寸法などにより異ならせおくと、金属管内の絶縁油に温度差を生じ、

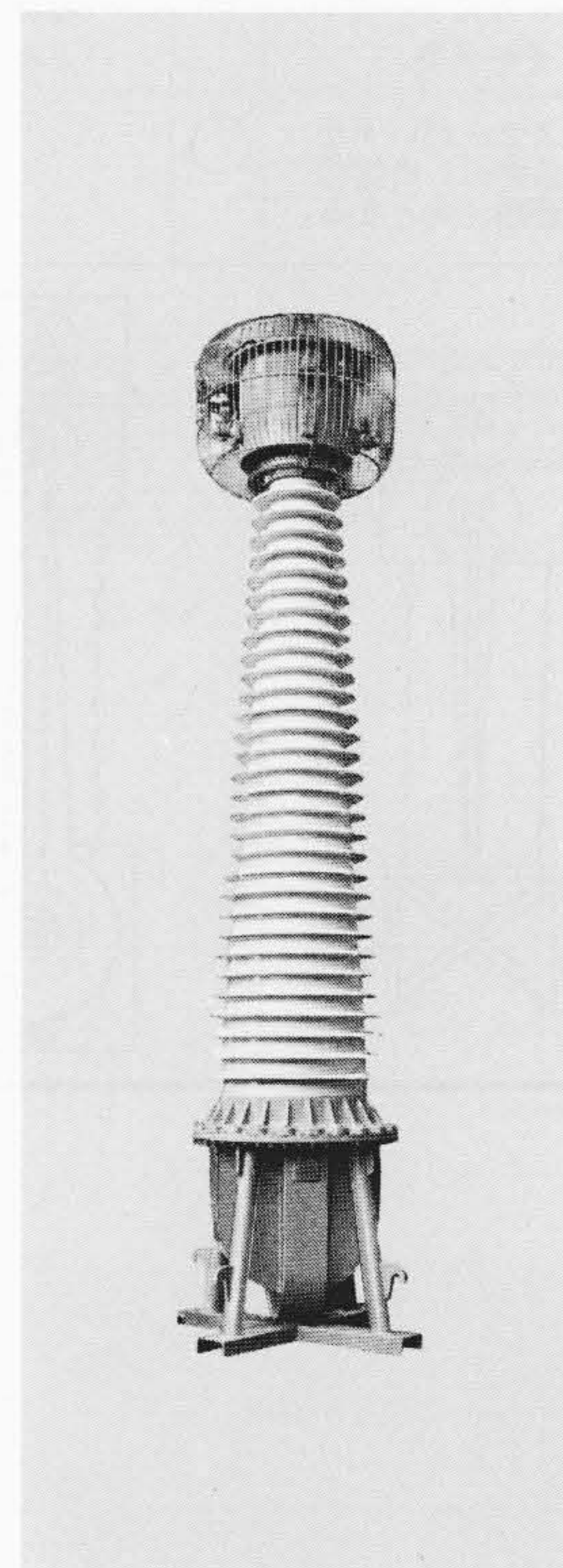


図1 500kV 1,200A 正立形変流器(昭和37年)

変流器の仕様は、1,200-600/1A 40VA+2×100VA 0.5級コンデンサ形計器用変圧器付であり、コンデンサ形計器用変圧器としては50VA 1.0級の特性が得られる。

Fig. 1 500kV 1,200A Current Transformer

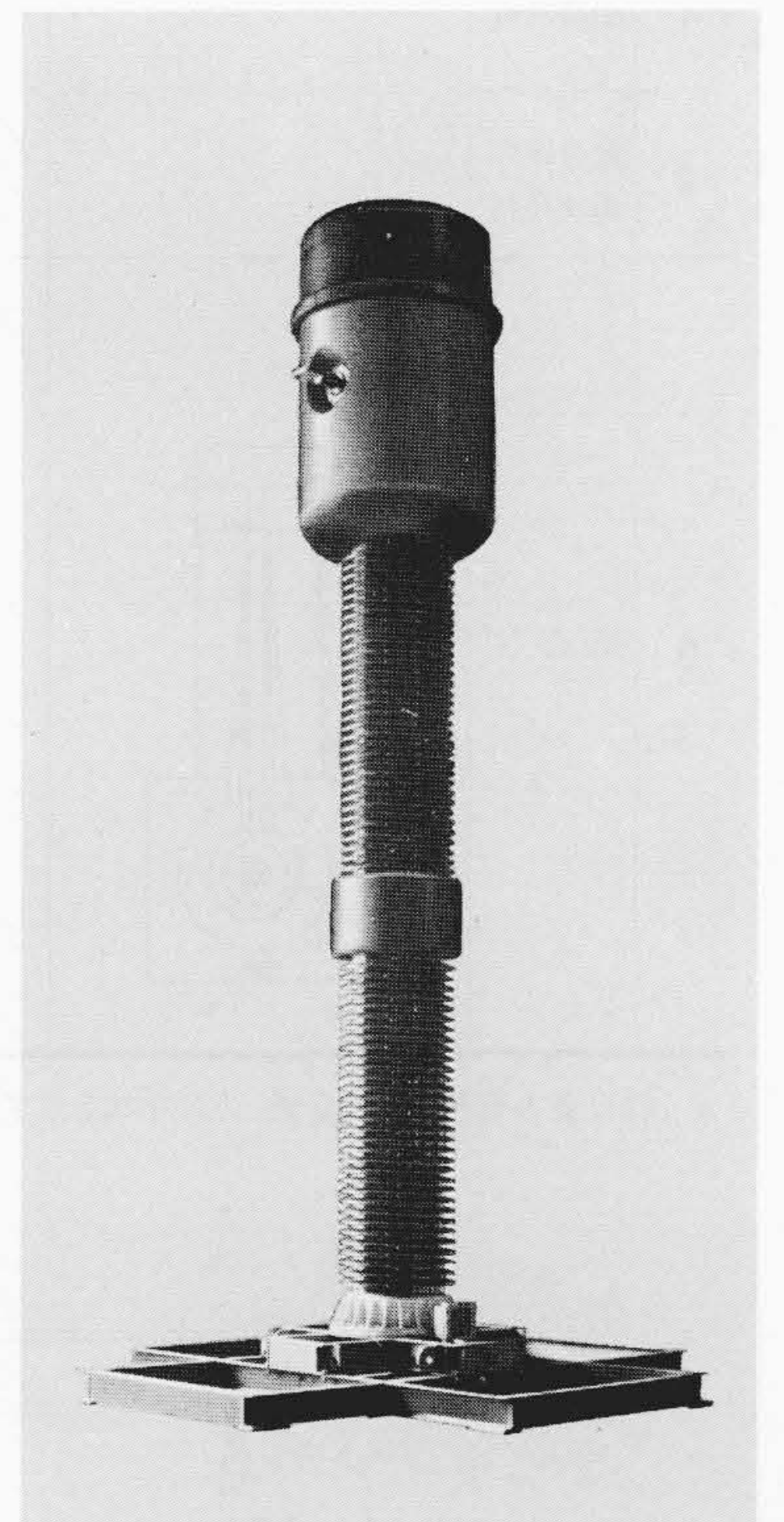


図2 カナダ、BCHPA 納め3,000A 倒立形変流器(昭和45年) 本変流器は一次回路時定数100ms, 140VA(力率0.45)で1サイクルの間、比誤差10%以内の過酷な過渡特性を十分満足するものである。

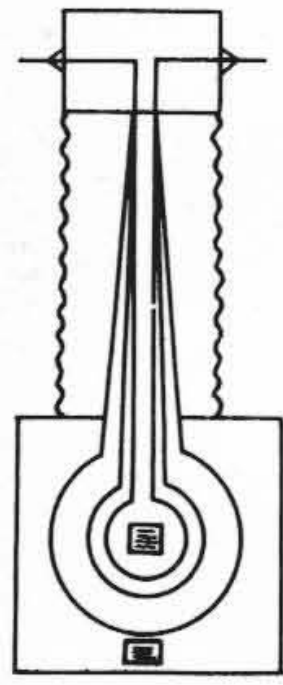
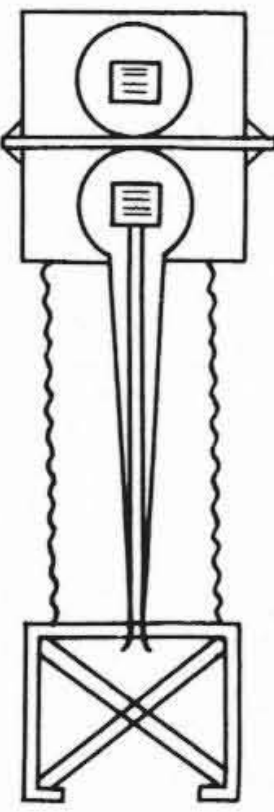
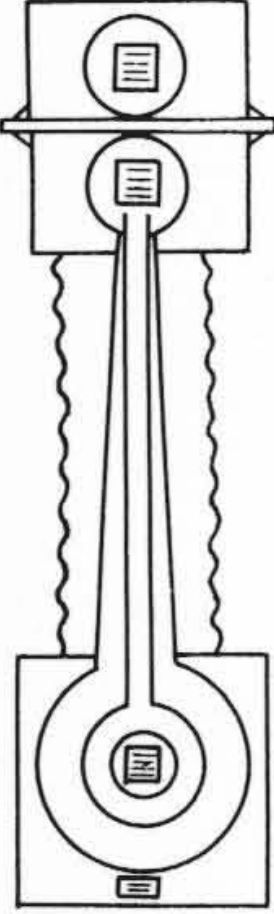
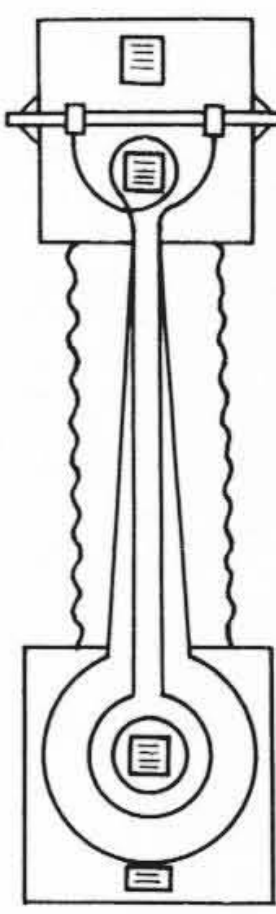
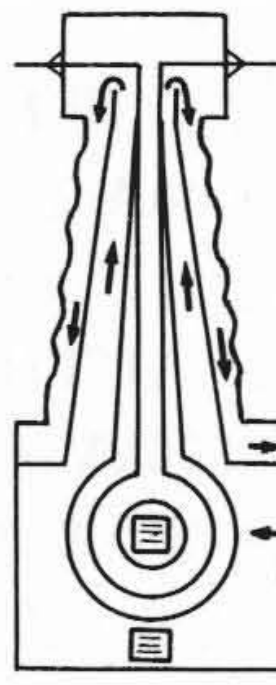
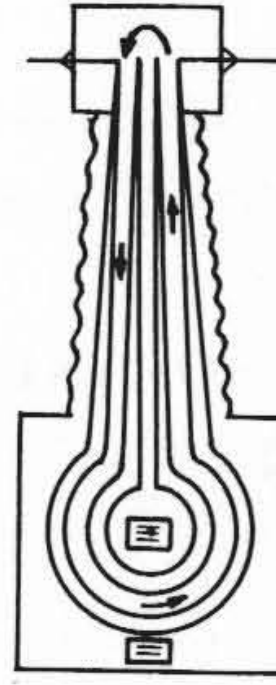
Fig. 2 550kV 3,000A Fully-Inverted Type Current Transformer for BC HPA, Canada

これに伴う絶縁油の密度差のため、絶縁油が発生損失の多い側の導体内を上方へ、少ない側の導体内を下方へ流れる。この油流によって導体を内部から冷却することができる⁽²⁾。デジタル計算機による計算および実物モデル実験により、なんらの補機を用いることなしに数cm/s～10cm/sの流速とこれによる良好な冷却が得られることを確認した。この原理により

* 日立製作所国分工場

表 I 500kV変流器の比較 過渡特性、耐塩害特性、冷却特性、耐震特性、据付保守の実用性および構造の比較を示す。

Table I Comparison of 500kV Current Transformers

No.	項 目	従来の正立形		倒立形（棒形）		正立カスケード形		分 流 形		正立強制冷却形		正立内部冷却形	
1	過渡特性	○	一次漏れ磁束により倒立形よりも鉄心断面積を大きくする要あり。	◎	一次漏れ磁束による影響少ない。	△	一次漏れ磁束により鉄心断面積を大きくする要あり。誤差要素が二重となっているため不利。	△	正立カスケード形にほぼ同じ。	○	従来の正立形に同じ。	○	従来の正立形に同じ。
2	耐塩害特性	◎	—	○	専用がい管が必要。	◎	—	◎	—	◎	—	◎	—
3	冷却特性	△	一次導体が完全に主絶縁におおわれているので3kA程度までが温度上昇の面から限界。	◎	—	◎	—	◎	—	◎	—	◎	—
4	耐震特性	◎	—	△	耐震性向上の面からステーがい子が必要。	○	頭部重量を軽減することが必要。	○	正立カスケード形にほぼ同じ。	◎	—	◎	—
5	据付保守の実用性	○	—	△	ステーがい子が必要のため据付面積が大となる。	○	—	○	—	△	ポンプおよび制御盤が必要。	○	—
6	構 造 図												

注：◎印最も有利，○印普通，△印不利を示す。

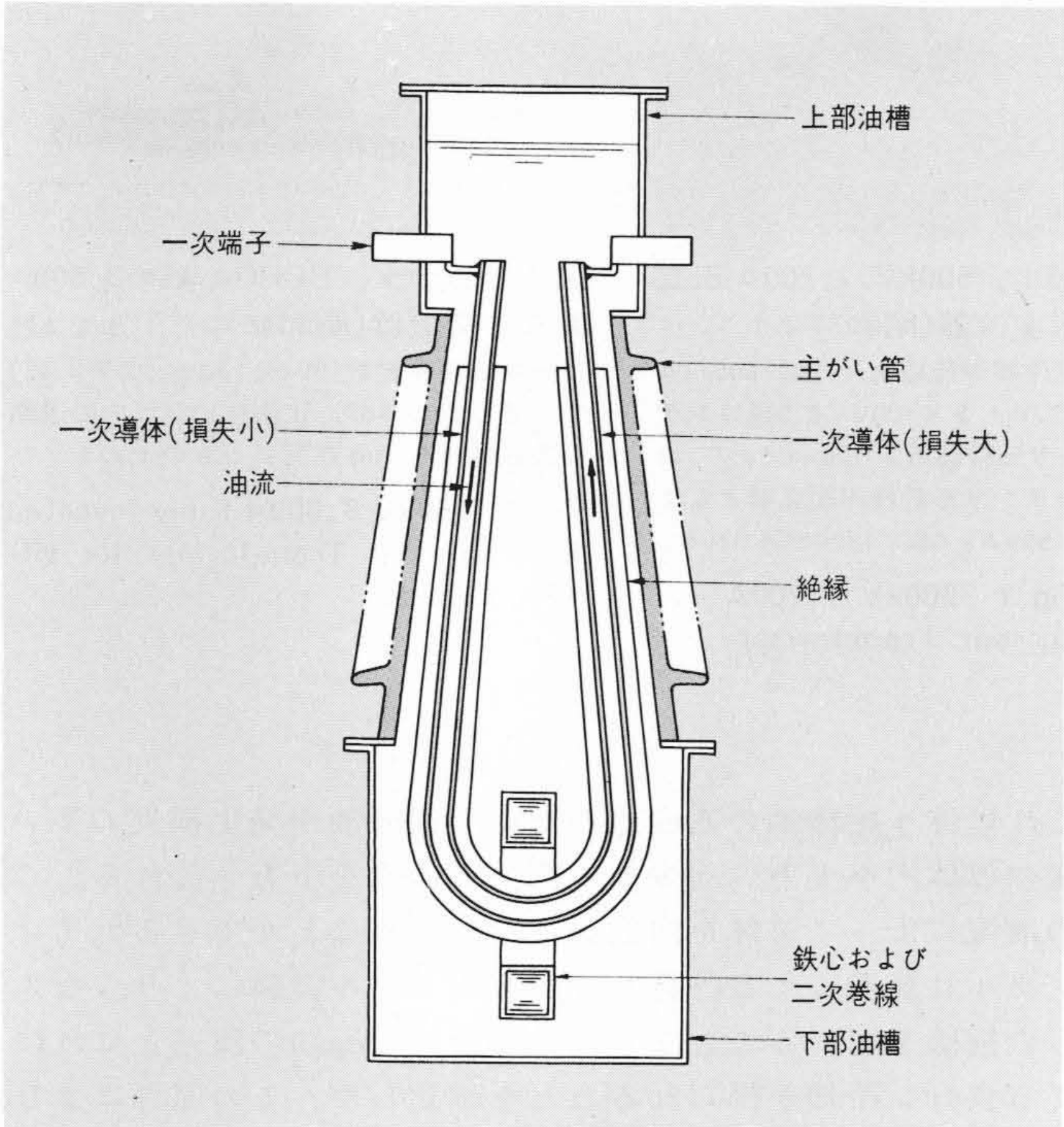


図 3 内部冷却形変流器の原理 両脚パイプ導体の発生熱を異ならせておき、温度差による密度差で内部の油を循環させる。

Fig.3 Principle of Oil-Circutation Type Current Transformer

製作した、287.5kV 4,000A 変流器の一例は図 4 に示すとおりである。また、図 5 は、デジタル計算機による温度上昇計算の General Flow Chart（以下、GFCと略す）を、図 6 は、デジタル計算機による287.5kV 4,000A 変流器一次導体の温度上昇計算値と実測値の比較を示すものである。

4 550kV 正立内部冷却形変流器試作器

4.1 構 造

表 2 は、正立内部冷却構造を採用して全長 8 m の長大がい管を使用し、昭和46年に試作完成した550kV 4,000A 正立内部冷却形変流器試作器の仕様を、図 7 は、試作器の外観を示すものである。本変流器は系統容量の増大を考慮し、6,000A 級変流器の温度上昇データを得られるよう、導体サイズを選んでいる。上部タンクには、熱放散を高めるため、放熱フィンを取り付け気中コロナ抑制のため、シールドを設けた。一次導体には常規対地電圧 $550/\sqrt{3}\text{kV} = 318\text{kV}$ （以下、1.0E と略す）の高電圧が印加されており、重要幹線に使用されるので特に安定した高度の信頼性が要求される。このため、日立製作所の287.5kV以下の変流器にて多数の実績がある容量分割絶縁方式を採用し、軸方向、径方向の電界強度の制御を行なった。絶縁材料も特に吟味したものを使用し、格付けされた作業員により、防塵空調室で一次導体の絶縁作業を行なった。鉄心は残留磁束を考慮し空隙付鉄心を使用し、二次巻線は全周均一に巻回した。下部タンクは耐震特性を向上させ

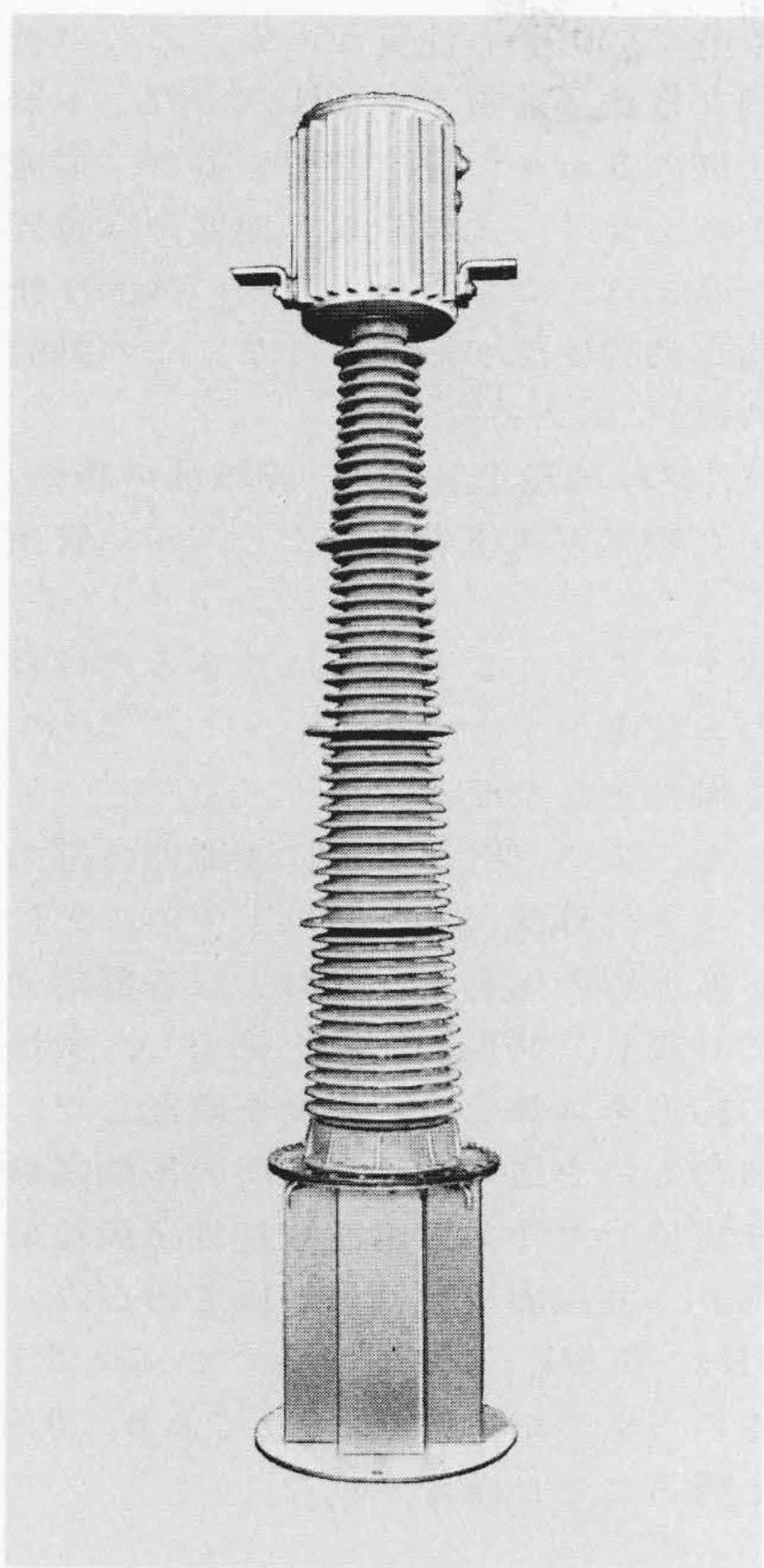


図4 287.5kV 4,000A内部冷却形変流器
デジタル計算機による計算および実物モデルによる実験により開発した。

Fig. 4 287.5kV 4,000A Current Transformer Using Oil Circulation

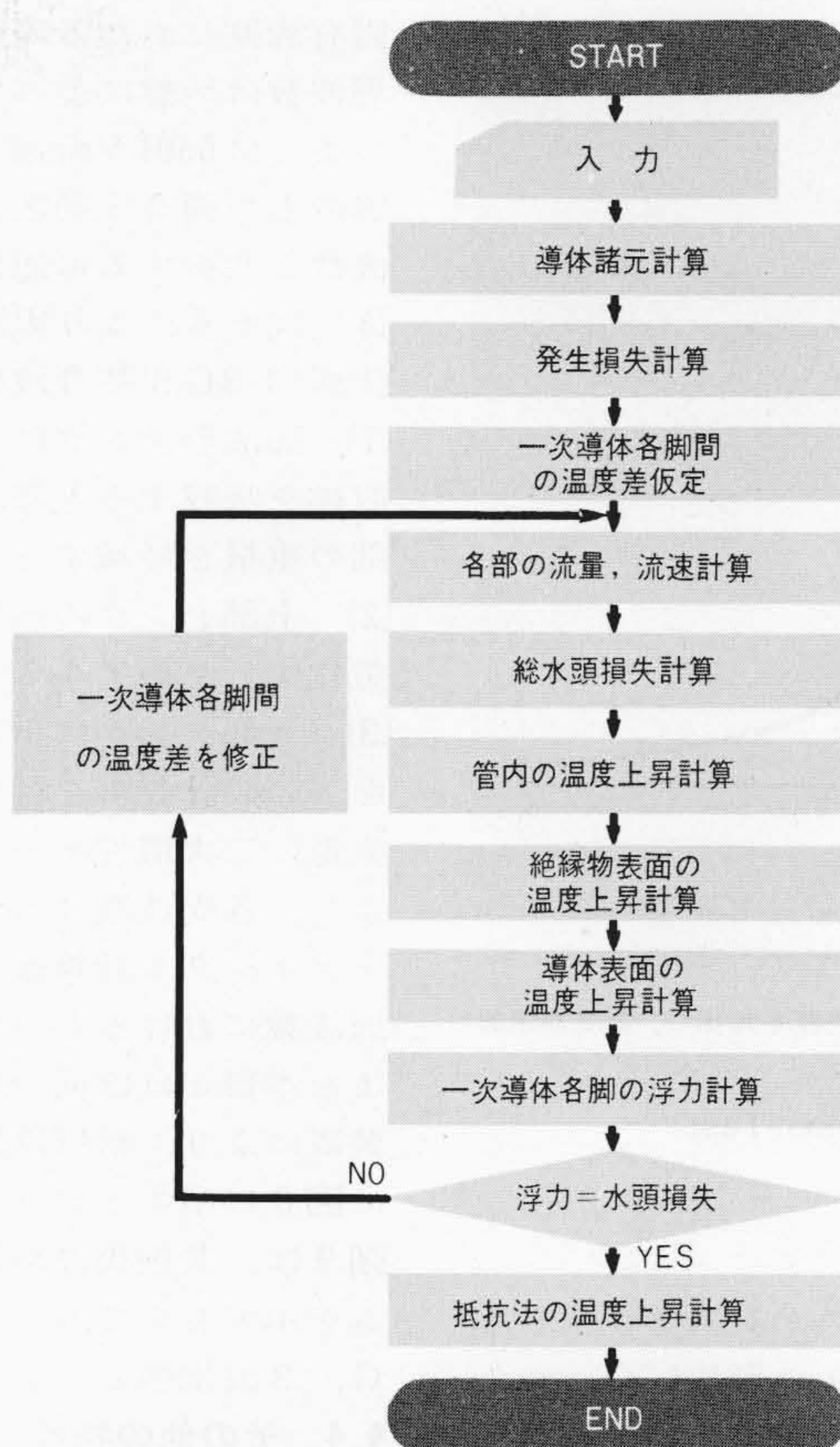


図5 温度上昇計算のフローチャート デジタル計算機により、一次導体の平均温度のほか、任意の点の温度上昇を精度よく計算することができる。

Fig. 5 General Flow Chart of Temperature Rise Calculation

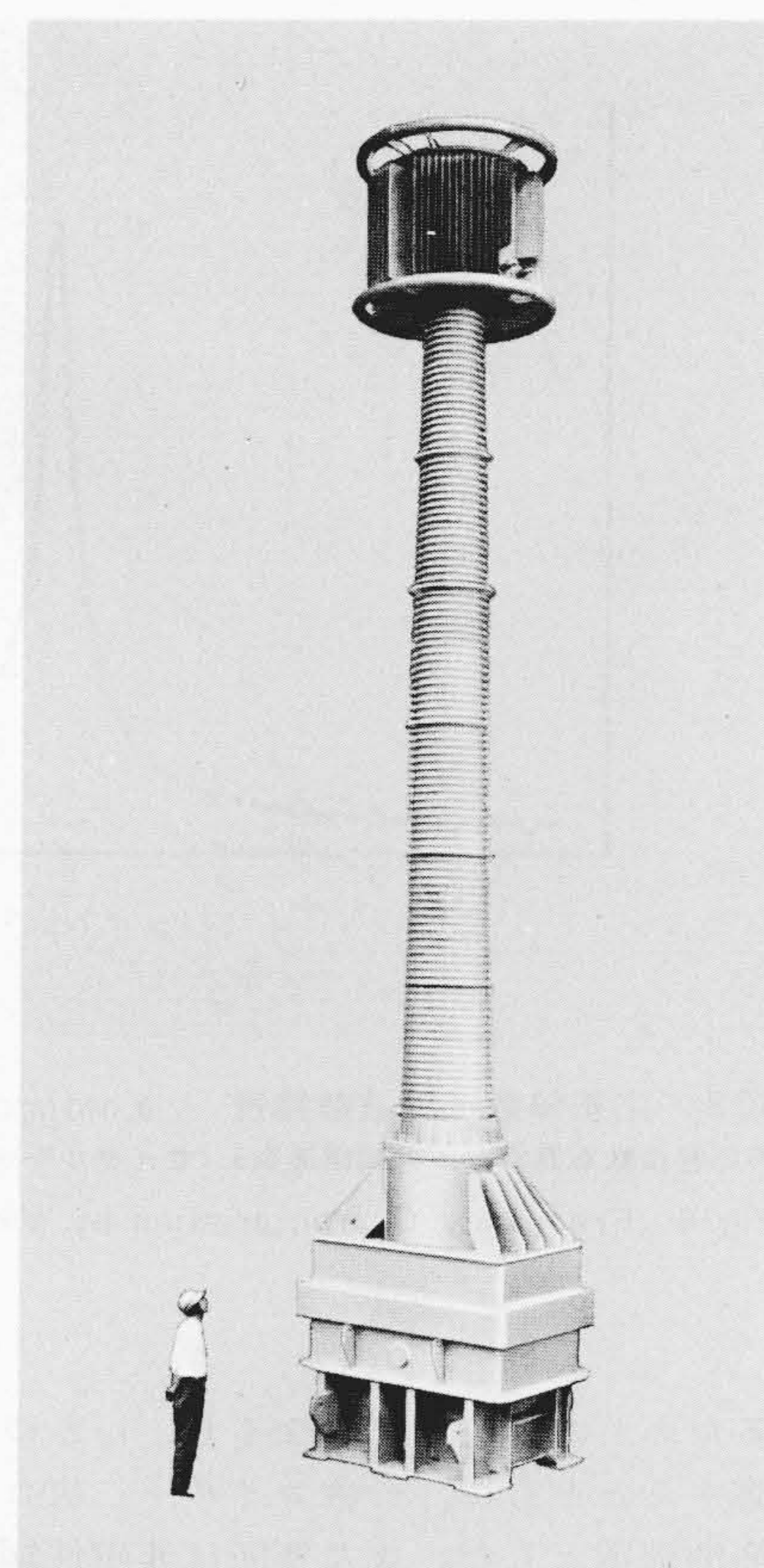


図7 550kV 4,000A 内部冷却形変流器
表2の仕様に十分満足することを確認した後、将来の系統容量の増大を考慮し6,000A、8,000Aの温度上昇試験を実施した。

Fig. 7 550kV 4,000A Current Transformer

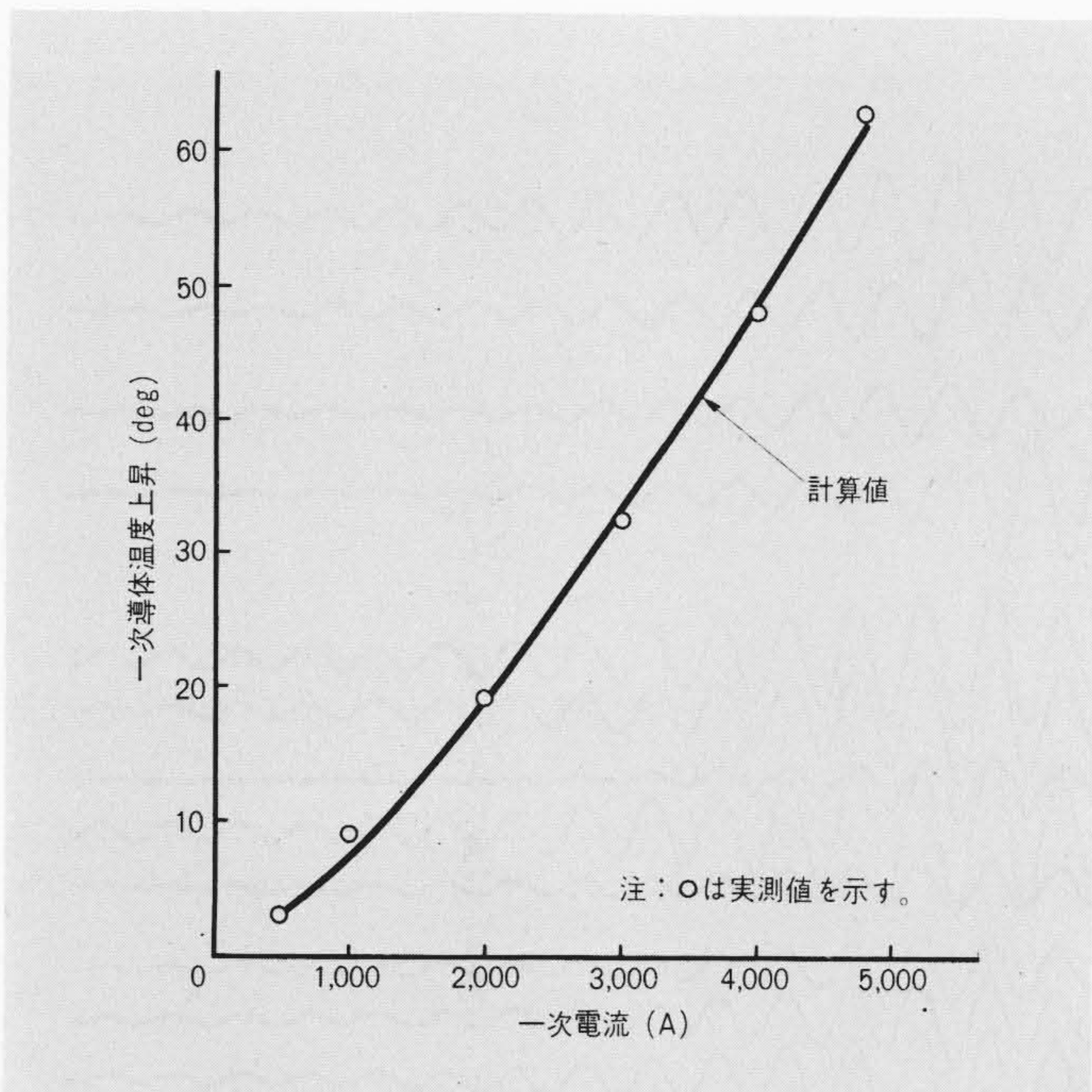


図6 287.5kV 4,000A内部冷却形変流器温度上昇計算値と実測値の比較 デジタル計算機による計算値と温度上昇の実測値(抵抗法)とがよく一致している例を示す。

Fig. 6 Test Results and Calculation Value of Temperature Rise of 287.5kV 4,000A Current Transformer

表2 550kV正立内部冷却形変流器試作器の仕様 系統容量の増大を考慮し、6,000A級変流器の温度上昇データが得られるよう配慮され、また8mがい管を使用した。

Table 2 Specification on 550kV Prototype Current Transformer

項 目	仕 様
1 形 式	屋外用单相がい子形、正立密封形、五重鉄心
2 定 格	(1) 最高電圧：550kV (2) 電 流 比：一次4,000A/二次5 A (3) 負 担：40VA+100VA×4 (4) 周 波 数：60Hz (5) 過電流定数：20以上(40VA鉄心のみ)
3 定格過電流	50kA-2秒
4 誤 差 階 級	1.0級(全二次巻線に対し)
5 絶 縁 耐 力	(1) 商用周波耐電圧：840kV (2) 衝 撃 波 耐 電 圧：1,800kV (3) 開閉インパルス耐電圧：1,200kV (4) 部分放電開始電圧：455kV以上
6 過 渡 特 性	100VA鉄心に対し直流分100%直流分時定数0.1秒の場合、1.5サイクル以内で誤差10%以下。 (負担力率1.0、鉄心の残留磁束は最大を考慮)
7 極 性	減 極 性
8 耐 震	0.3G 正弦波共振3波において、安全率はいが管破壊強度に対し1.0以上。
9 汚損時耐電圧	等価塩分付着量0.03mg/cm ² において、対地電圧364kV。 (8mがい管を使用)

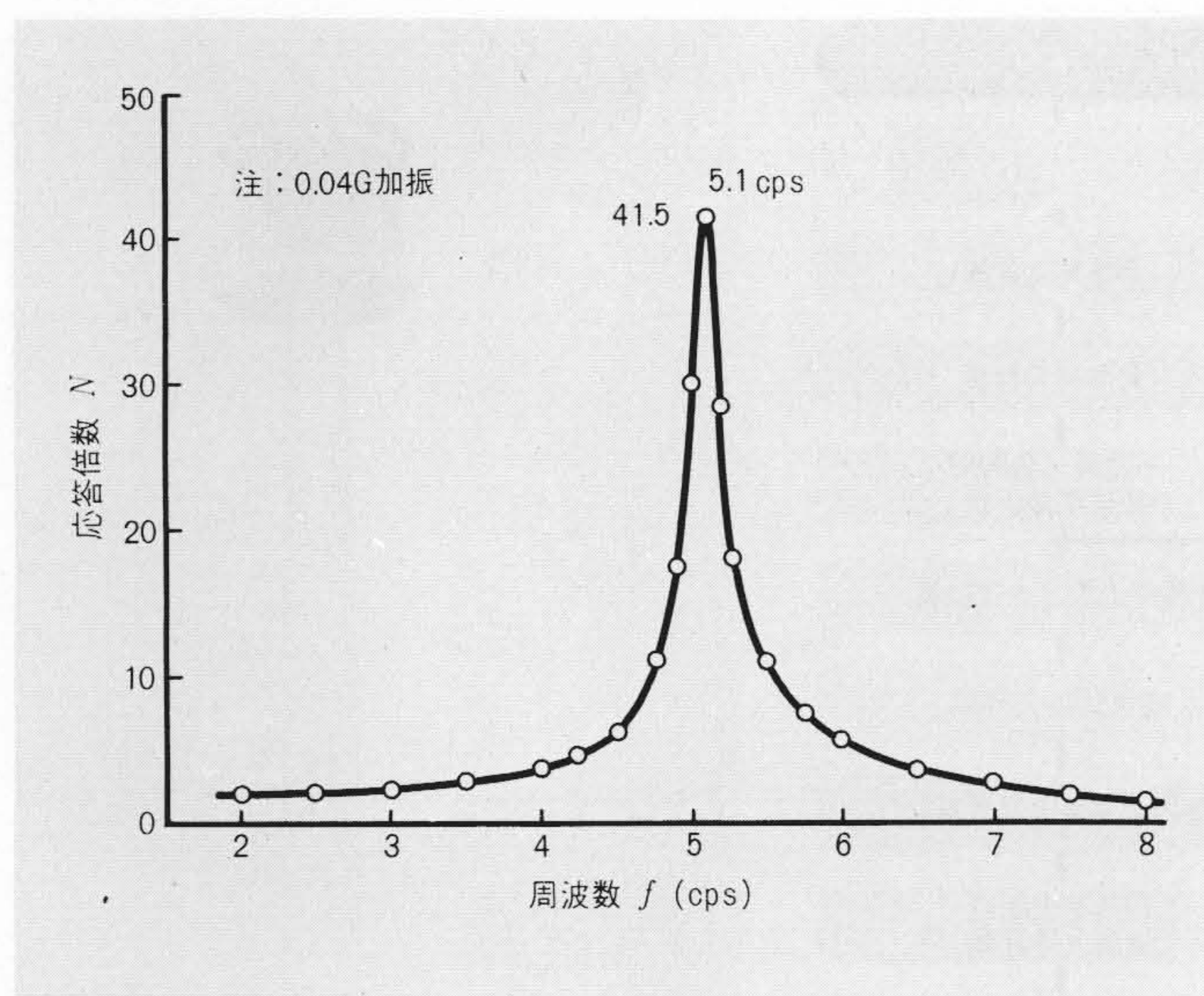


図8 応答倍数一周波数特性 0.04Gにて変流器を加振し、変流器頭部の応答倍数を測定し、共振周波数5.1サイクルを求めた。

Fig. 8 Frequency Characteristics by Vibration Test

るため、応力集中を少なくし、いわゆるストレスフローを考慮するとともに、一次コイル、二次コイルの形状に合わせた節油構造とした。また要所に非磁性鋼材を使用し局部過熱を防止し、油の劣化防止のため窒素ガス密封方式とした。

4.2 温度上昇

本器に温度上昇試験を実施した。一次電流 4,000A、60Hz 通電時の温度上昇は、一次巻線33deg、二次巻線13.5deg、上部タンク27deg、下部タンク12degであった。

4.3 耐震特性

一般に地盤(表面層)内で地震波が重複反射して、表面層の

固有周期にあたる周期の波が卓越する性質がある。この卓越周波数は地盤によって異なるが、通常1～10Hzである。本器のように550kV耐塩害仕様の8mがい管を使用すると、変流器のもつ固有振動数が小さくなり、その結果、地盤の卓越周波数と共振する可能性が高まる。このため、従来の静的な仕様に代わり、より実動的な動的仕様が追加された。この動的仕様(0.3G正弦3波擬共振)に耐えるため、

(1) 節油形タンクにより、絶縁油量を低減し、絶縁油の膨張、収縮を吸収する上部タンク窒素ガス室を小さくし、がい管頭部の重量を軽減する。

(2) 上部タンクの熱放散をそこなうことなく、できるだけ軽量化するためアルミニウム製タンクとする。

(3) 下部タンクに十分な剛性をもたせる。

などの設計改善を行なった。この設計をもとに変流器各部の重量、二次慣性モーメントを計算機にインプットすることにより、各周波数における変流器の振動モードおよび各部応力をデジタル計算機にて計算し、共振周波数を算出し、共振周波数におけるがい管の応力を計算し設計裕度を確認した。また本器とほぼ同一形状のものを用地立製作所の振動試験装置により、耐震試験を実施した。共振周波数特性試験結果は図8に示すとおりであり、共振周波数は5.1Hzであった。

図9は、共振周波数5.1Hz、0.3G、3波加振時のオシログラムを示すものである。このときの応答倍数は9.5であり、0.3G、3波加振に十分耐え得ることが確認された。

4.4 その他の特性

本器は上記温度上昇、耐震特性のほか、絶縁特性、過渡特性などに良好な特性を得た。

5 550kV正立内部冷却形変流器

8mがい管を使用した550kV正立内部冷却形変流器試作器により得られた資料より、関西電力株式会社北摂変電所および京北変電所納め、6.5mがい管を使用した550kV正立内部冷却

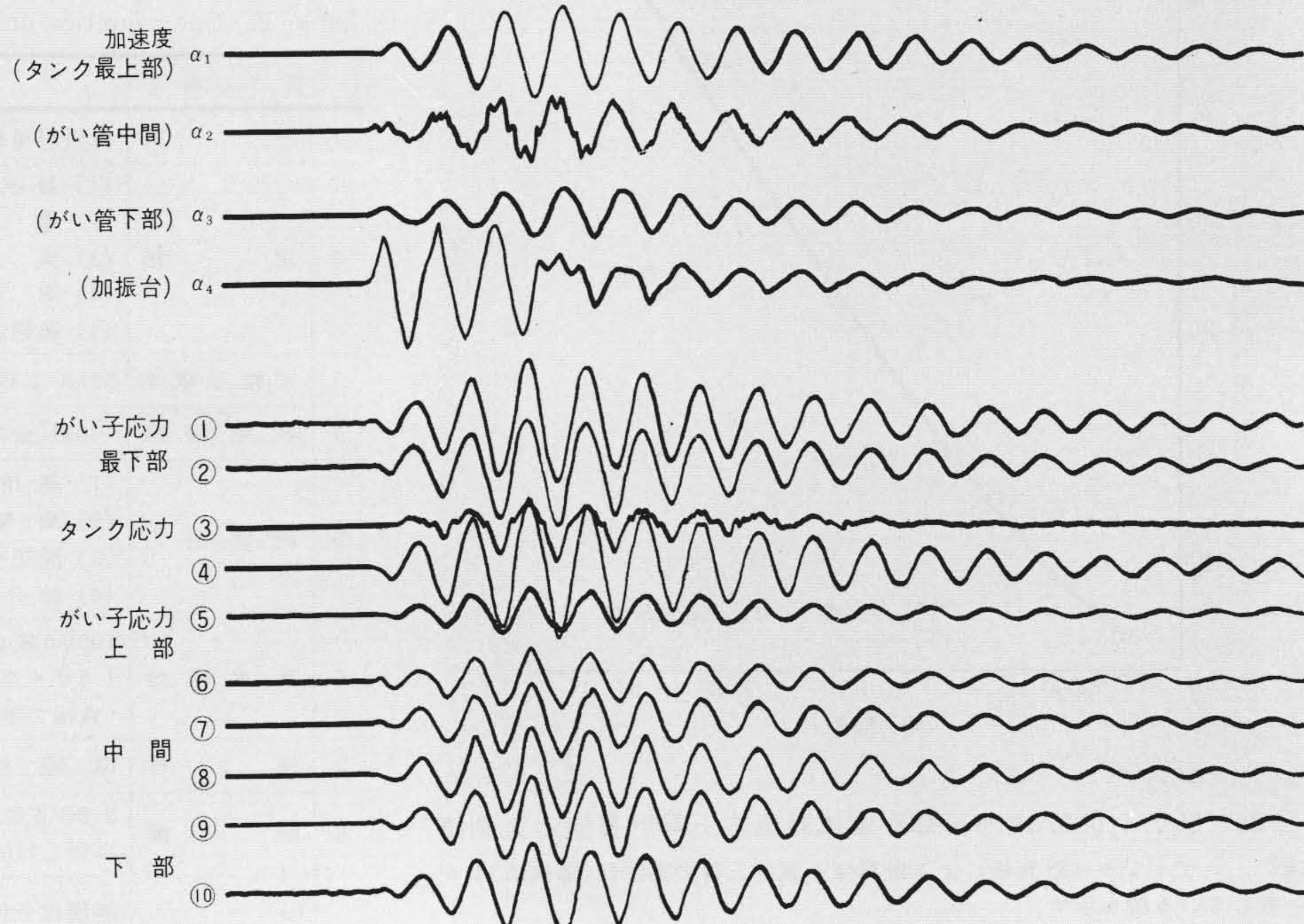


図9 共振周波3波加振時のオシログラム 0.3G 3波加振時がい子最大応力は131kg/cm²であり十分耐えることが確認された。

Fig. 9 Response Waveforms of 550kV Current Transformer to Three Sinusoidal Pulses

表3 関西電力株式会社納め550kV変流器仕様 下記五重鉄心仕様のほか、No.4、No.5鉄心がない三重鉄心仕様の2種類の仕様で納入される。

Table 3 Specification on 550kV Current Transformer for Kansai Electric Power Company Ltd.

項 目	仕 様
1 形 式	屋外用单相がい子形、正立密封形、五重鉄心
2 定 格	(1)最 高 電 圧：550kV (2)電 流 比：一次4,000A／二次5 A (3)負 担：40VA+100VA×2+60VA×2 (4)周 波 数：60Hz (5)過電流定数：20以上(40VA鉄心のみ)
3 定格過電流	50kA-2秒
4 誤 差 階 級	1.0級(全二次巻線に対し)
5 絶 縁 耐 力	(1)商 用 周 波 耐 電 圧：840kV (2)衝 撃 波 耐 電 圧：1,800kV (3)開閉インパルス耐電圧：1,200kV (4)部 分 放 電 開 始 電 圧：455kV以上
6 過 電 流 定 数	No.1鉄心のみ $n > 20$
7 過 渡 特 性	No.2、No.3鉄心に対し、短絡電流実効値50kA直流分100%重量、負担力率1.0残留磁束最大の条件で、 (1)直流分時定数0.1秒にて、2サイクル以内比誤差10%以下。 (2)直流分時定数0.03秒にて、時間に関係なく比誤差10%以下。
8 励 磁 特 性	No.4、No.5鉄心に対し、 (1)励磁電圧600Vのとき励磁電流0.1A以下。 (2)飽和電圧1,200V以下。 (3)二次巻線抵抗2Ω以下(75℃)
9 極 性	減極性
10 耐 震	0.3G正弦波共振3波において安全率はがい管破壊強度に対し1.0以上
11 汚損時耐電圧	等価塩分付着量0.01mg/cm ² において対地電圧361kV (6.5mがい管を使用)



図10 関西電力株式会社納め550kV 4,000A正立内部冷却形変流器 6.5mがい管を使用した550kV 4,000A変流器に長期課電試験を行なった。
Fig. 10 550kV 4,000A Current Transformer for Kansai Electric Power Company Ltd.

表4 絶縁特性 各耐圧試験終了後、部分放電試験を行ない絶縁特性に変化のないことを確認した。

Table 4 Di-Electric Test on 550kV Current Transformer

No.	試験項目	試 験 内 容
1	部分放電試験	1.5Eまでコロナフリーであることを確認後、1.5E60分-2E5分-1.5E60分印加し、NEMA法によりバックノイズレベル以下であることを確認した。
2	tanδ-電圧特性試験	tanδは0.26%以下で、電圧特性は1.0Eまで平坦である。
3	商用周波耐電圧試験	840kV耐電圧試験時もコロナレベルを測定しながら電圧を上昇させた。 840kV1分間保持し異常ないことを確認した。 840kV印加時コロナレベルは、バックノイズレベル以下であることも同時に確認された。
4	部分放電試験	2.0Eまでコロナフリーであることを確認した。
5	衝撃波耐電圧試験	全波1.0×40μs、1,800kVを正負各5回印加したが異常はなかった。
6	部分放電試験	2.0Eまでコロナフリーであることを確認した。
7	開閉インパルス耐電圧試験	開閉インパルス耐電圧220×5,200μs、1,200kVを正負各5回印加したが異常はなかった。
8	部分放電試験	2.0Eまでコロナフリーであることを確認した。
9	商用周波耐電圧試験	以上の試験にて絶縁に異常がなかったことを確認する意味にて、再度840kV1分間印加し、異常ないことを確認した。
10	部分放電試験	2.0Eまでコロナフリーであることを確認した。
11	過電圧試験	試験電圧の1.1倍の商用周波耐電圧値、衝撃波耐電圧値および開閉インパルス耐電圧値を印加し異常のないことを確認した。

形変流器を完成した(図10)ので、その絶縁特性、過渡特性につき以下に述べる。なお本器の仕様は表3に示すとおりである。

5.1 絶縁特性

絶縁特性のうち、最も重視したのは部分放電特性である。このため、通常の絶縁試験に部分放電試験を組み合わせ、絶縁特性の確認を行なった結果は表4に示すとおりである。

5.2 過渡特性

500kV送電保護リレー方式では、超高速動作が要求され、変流器は事故発生直後の第1波電流波形をいかに正確に二次に変成するかが重要な課題である。このため、デジタル計算機を利用し、磁化特性のヒステリシスを考慮し残留磁気がある場合を含めて解析し得ることはすでに述べたので割愛する⁽³⁾。直流分が重畳した一次電流が流入することにより、交流分のみに比べどの程度余計に磁化されるかについて述べる。100%直流分が重畳した過渡一次電流 ip は⁽⁴⁾、

$$ip = Ip \{ \sin \omega t - e^{-\frac{t}{T}} \} \dots\dots\dots (1)$$

この電流により、鉄心に生ずる磁束 Φ_{max} は、

$$\Phi_{max} = \frac{NpIp \times 10^8}{Ns \omega} \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \left\{ \sin \left[\omega t + \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right) \right] - \omega T \cos \theta (1 - e^{-\frac{t}{T}}) - \sin \theta e^{-\frac{t}{T}} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\equiv \frac{NpIp \times 10^8}{Ns \omega} \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \cdot f(t) \dots\dots\dots (3)$$

$$f(t) \equiv \sin \left[\omega t + \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right) \right] - \omega T \cos \theta (1 - e^{-\frac{t}{T}}) - \sin \theta e^{-\frac{t}{T}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

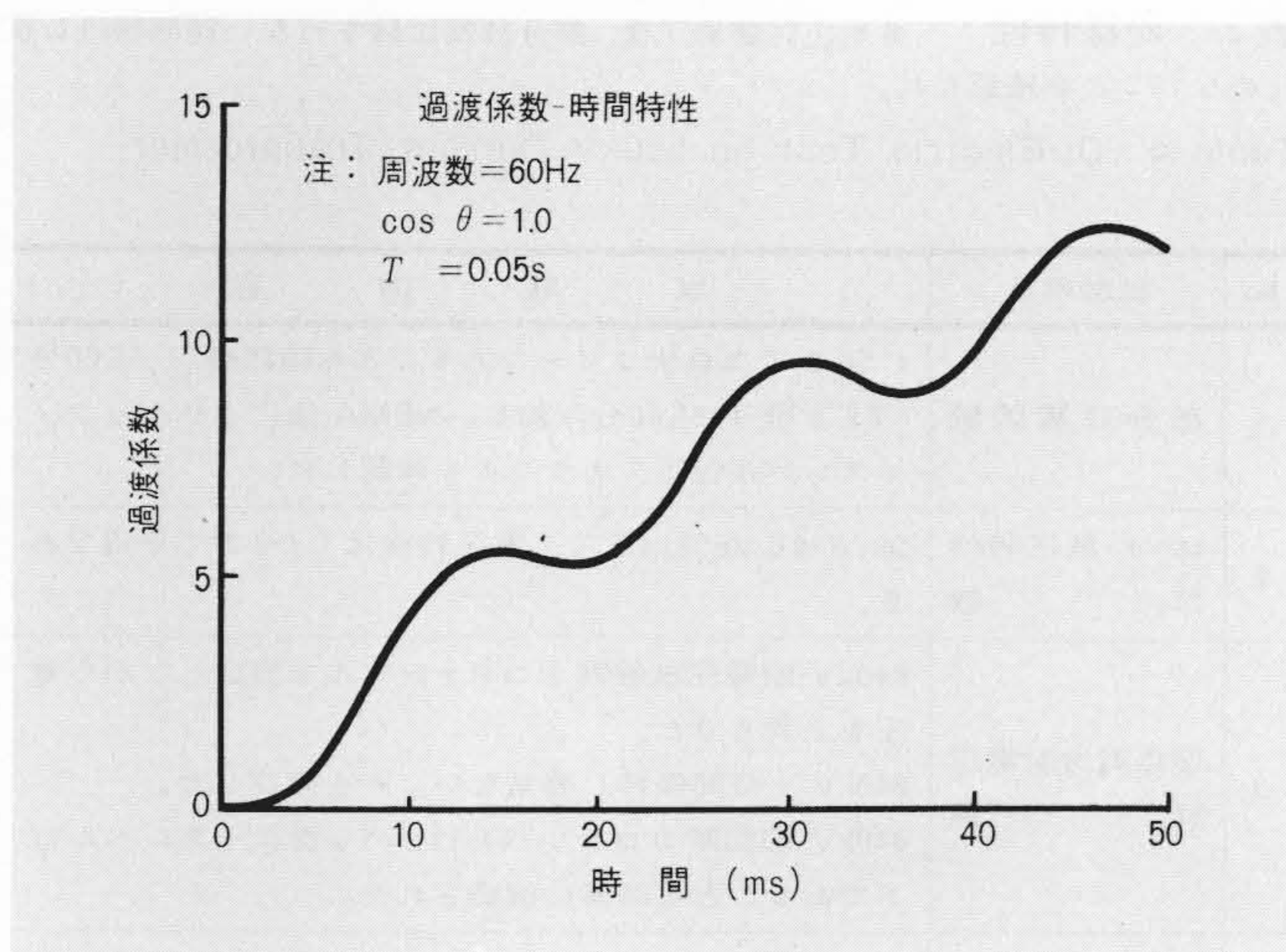


図11 過渡係数-時間特性 直流分を含む過渡一次電流が流れたとき、鉄心に発生する磁束の変化と考えることもできる。

Fig. 11 Transient Factor-Time Characteristics

表5 最大過渡係数 図11に示すように、鉄心中の磁束は時間とともに変化するが、その最大値と経過時間の関係を示す。

Table 5 Maximum Transient Factors

周波数 時定数 直流分 継続時間	50 Hz				60 Hz			
	200ms	100ms	70ms	50ms	200ms	100ms	70ms	50ms
1 サイクルまで	6.01	5.76	5.58	5.35	6.05	5.84	5.68	5.48
1.5 サイクルまで	8.75	8.14	7.66	7.09	8.85	8.33	7.92	7.41
2 サイクルまで	11.46	10.53	9.84	9.03	11.63	10.83	10.21	9.49
3 サイクルまで	16.41	14.46	13.07	11.53	16.78	15.06	13.81	12.39
4 サイクルまで	20.89	17.69	15.52	13.23	21.52	18.67	16.67	14.49
5 サイクルまで	24.96	20.34	17.36	14.37	25.88	21.72	18.93	16.00

注：二次力率 $\cos \theta = 1.0$

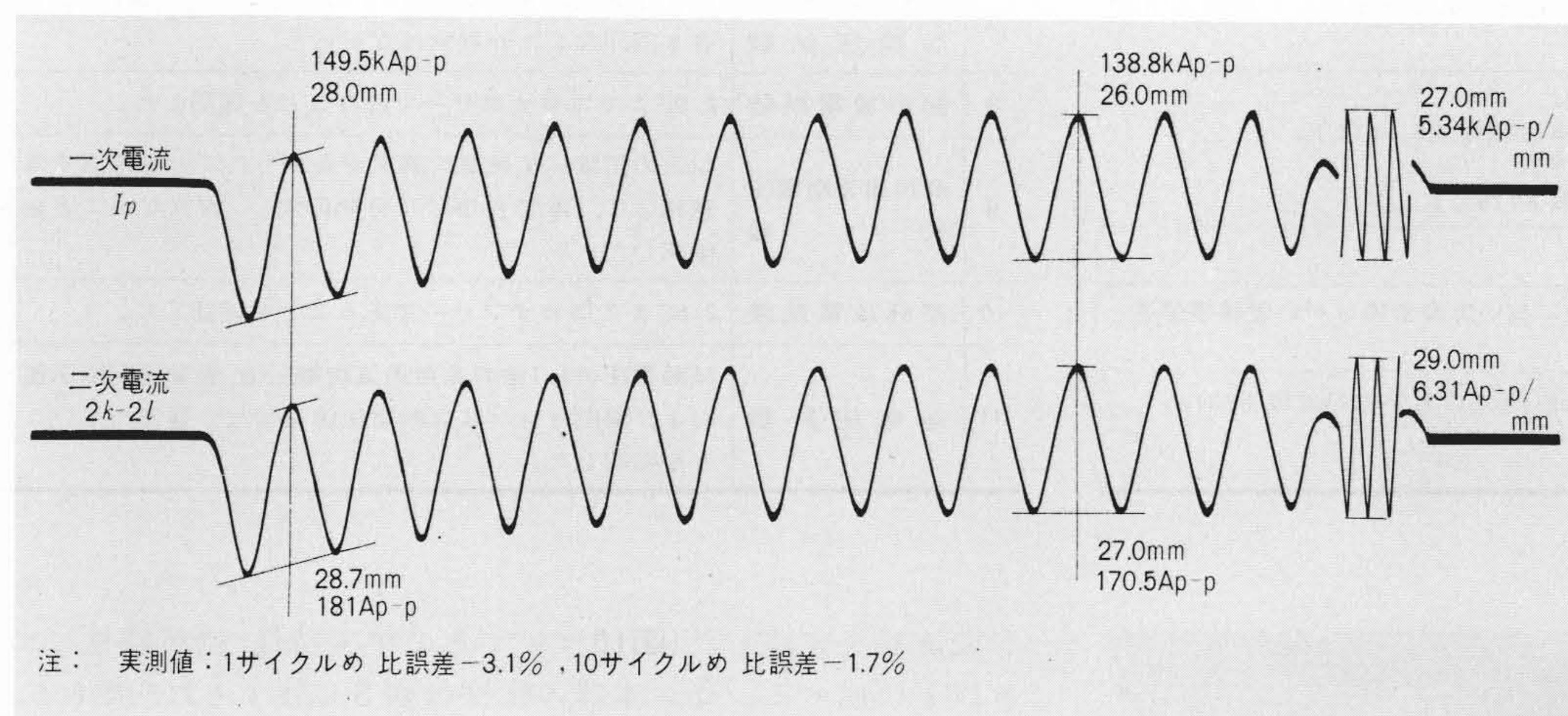


図12 過渡特性時の電流オシログラム 変流器二次回路に100VA $pfl.0$ の負担を接続し、時定数30ms、短絡電流50kA、直流分100%重畳、残留磁束最大時の一次・二次波形を示す。

Fig. 12 Waveforms of Transient Currents

I_p ：定常電流の最大値

T ：回路の定数

N_2 ：変流器の二次巻数

R_2 ：変流器の二次回路の抵抗

L_2 ：変流器の二次回路のインダクタンス

$$\cos \theta = R_2 / \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}$$

$f(t)$ は一般に過渡係数と呼称されており、交流分のみによる磁束に比べ、交流分と直流分の和の磁束が $f(t)$ 倍になることを意味する。この過渡係数 $f(t)$ は時間の関数であり、直流分の継続時間を考慮に入れるとき、継続時間までの過渡係数の最大値を求め、このときも鉄心が飽和しないように設計する必要がある。周波数60Hz、 $\cos \theta = 1.0$ 、 $T = 100\text{ms}$ 直流分の継続時間を2サイクルまでとすると表5より最大過渡係数は10.83となる。一次電流2,000Aが流れているときの磁束に比べ、直流分を100%含んだ50kAの短絡電流が流入したときの磁束は、 $10.83 \times 50\text{kA} / 2\text{kA} = 271$ 倍となる。一般に過電流定数 $n > 20$ のものに比べると、鉄心断面積は $271 / 20 = 13.6$ 倍とする必要がある。図11は、直流分を含んで短絡電流により鉄心が磁化されていく状況を示すものである。上記直流分磁化を考慮に入れ設計された本器に対し、過渡誤差試験を実施した。図12は、過渡特性時の電流オシログラムを示すものである。このオシログラムの測定結果より比誤差は、-1.7%

～-3.1%程度であり十分特性を満足することを確認した。

6 結 言

550kV大電流変流器は昭和45年倒立形としてカナダBCH PAに納入以後正立形の要求が高まり、これに対し内部冷却方式を開発して製品化した。現在、関西電力株式会社北摂変電所および京北変電所用納入品を多数製作中である。550kV送電の重要性にかんがみ、今後とも関係部門一体となって改善に努力し、高度の信頼性をもつ安定した製品の生産を期すためいっそうの研鑽を重ねたい所存である。

参考文献

- (1) 森戸、三木：「500kV計器用変成器」日立評論51, 6, 67 (昭44-6)
500kV倒立形変流器の構造、絶縁特性について述べている。
- (2) U.S. Patent 3, 686, 598 "Current Transformer"
- (3) 森戸、三木：「500kV計器用変成器」日立評論51, 6, 67 (昭44-6)
デジタル計算機を利用し、磁化特性のヒステリシス、残留磁気を考慮した計算法について述べている。
- (4) 浅野：「変流器の過渡特性に対する一考察」日立評論別冊23, 45 (昭33-6)
直流分を含む電流に対する変流器の特性について述べている。