

PLA-95-8

95/6/19

1 GeV リニアック検討資料

1 GEV LINAC DESIGN NOTE

題目(TITLE) UHFクライストロン電源・高圧直流電源部の不具合およびその調査・修理

著者(AUTHOR) 川村真人

概要(ABSTRACT)

UHFクライストロン電源運転時に、高圧直流電源部に付属する電圧メータの表示と、負荷側で検出した電圧値との間に差異が見られ、また長時間運転すると負荷側の電圧値が不規則に変動した。

業者を呼んで修理を依頼したが、不具合な箇所が特定できず長引いた。3度目の修理の依頼でオイルタンクを開け、電圧検出用抵抗を取り替えることで解決した。

本資料では不具合の様子、および最終的な修理に至るまでの過程を詳述する。

KEY WORDS: Ion Source, RFQ, DTL, Magnet, Monitor, Beam Dynamics, Transport, Vacuum, Cooling, Klystron, Low Level RF, High Power RF, Modulator, Control, Operation, Radiation, Others

高エネルギー物理学研究所 KEK

UHF クライストロン電源・高圧直流電源部の不具合およびその調査・修理

(文責・川村)

1. 概要

94年8月10日の運転時に高圧直流電源部に付属する電圧メータの表示と、負荷側で検出(クローバきょう体内の分圧抵抗、およびクライストロンタンク内の高圧プローブ)した電圧値との間に差異が見られた(負荷側表示(3ヶ所の平均値) / (電源メータ表示) = 84 ~ 88%)。8月12日、8月15日の運転時にはそのような差異は見られず、後日の運転時に様子を見ることにした。

12月1日15時頃から2日17時20分頃にかけて、DTL および RFQ の大電力試験を行なった際に、やはり高圧直流電源部に付属する電圧メータの表示と、負荷側で検出した電圧値との間に差異が見られ、クライストロンタンク内の高圧プローブで検出した電圧のレベルを長時間記録すると、不規則な増加、減少が見られた。その時の記録を図1-1、2に示す。

※以下、カット電圧の値は絶対値で示す。

→ 電圧印加開始時(デューティ 600 μ s \times 30 pps)、カット電圧を70 kV に合わせるため(DTL の定格による)50 kV から徐々に上昇させたところ、はじめ電源メータ表示80 kV までは、(負荷側表示(3ヶ所の平均値) / (電源メータ表示) = 80 ~ 84%)を示し、負荷側表示が70 kV 未満のため、電源メータ表示が84 kV になるまで上げた。すると負荷側表示が急に上昇して(負荷側表示(3ヶ所の平均値) / (電源メータ表示) = 93.7%)となり、負荷側表示が78.7 kV となった。電圧が上がりが過ぎたため電源メータ表示75 kV、負荷側表示70.3 kV で運転を開始した。その後不規則な電圧の増加・減少が見られ、運転開始後17時間30分経過するまで71 ~ 76 kV を示した。そして約10分間激しく変動した後減少し、約45分間64 kV を示した。電圧が自然に回復した後の約1時間20分のうち約10分間は激しい変動が見られる。運転開始から約19時間40分経過した後繰り返しを10 pps に下げ、カット電圧を電源メータ表示で86 kV、プローブ表示で81 kV まで上昇させた(DTL 大電力試験から RFQ 大電力試験への変更)。なお、この時(プローブ表示) / (電源メータ表示) = 94.2% である。約15分後から繰り返しを10 pps \rightarrow 20 pps \rightarrow 50 pps に変更した。80 kV 以上に上昇させてから約2時間30分は81 ~ 84 kV を示した。そして(運転開始から約22時間20分経過後)一旦78 kV 以下まで減少した後約87 kV まで上昇し、電源メータ表示とプローブ表示とがほぼ一致した。RFQ 大電力試験用としては電圧値が大きすぎるため83 kV 程度まで減少させて運転をおこなった。その約4時間の間、82 kV 程度までの減少が見られた。

2. 12月14日までの報告

12月2日の昼過ぎに(株)日立製作所日立工場に修理を依頼(窓口、電開・金澤氏)、6日から9日にかけて同EQA品証課から1名(田口氏)が来所、点検・修理を行なった。作業内容は以下の通り。

・6日11時20分頃から7日16時22分まで、カット電圧70 kV、デューティ 600 μ s \times 50 pps で運転を行なった。同時に高圧直流電源部のマスターコントロール回路の各箇所の電圧値をペンレコーダに記録した。マスターコントロール回路(AVR01)の回路図を図2-1、2に示す。ペンレコーダの記録を図3-1 ~ 4に示す。

→ 図3-1、2より、試験開始後約1時間20分経過してから約1.3 kV 電圧が上昇し(上昇後の電圧値はほぼ72.0 kV)、その後約2時間20分経過(試験開始後約3時間40分経過)して4 kV 近く急激に減少、約30分間電圧は不安定になり、最も低いところでは59.0 kV 以下にまで減少した。この30分間を過ぎると再び上昇し、ほぼ73.0 kV となった。約11時間経過(試験開始後約15時間10分経過)するまで、電圧値に不規則な変動はないが、徐々に減少している(73.0 kV \rightarrow 72.0 kV)。そして急に59.0 kV まで減少し、すぐに72.0 kV に復帰した。以後、終了までの約13時間50分の間、電圧値は不規則な変動をしながら徐々に減少し、69.8 kV 程度になった。

図3-3より、サイリスタ制御電圧の波形はクライストロンカット電圧波形とほぼ同様の変動が見られるが、サイリスタ制御電圧波形の方が細かい変動が見られる。サイリスタ制御電圧が変動する時にフィード

バック電圧（絶縁アンプの出力）が変動しヒケのようなものが見られ、AVRが動作しているのが確認される。電圧パターン信号は2ヶ所でわずかな変動がみられ、その他の箇所ではほとんど安定しているが、長時間にわたって見ると、わずかに増減している。

図3-4より、絶縁アンプの入力電圧と出力電圧とを比較するとほとんど同じ波形で（しいて言えば出力の方が変動が大きい）、絶縁アンプのリアリティが確かめられる。

・上記運転中、AVR01回路中の絶縁アンプ（ANALOG DEVICES, AD210AN）5個のうちI.AMP 3～5（遠隔制御での電圧値、電圧の上限値、下限値の設定に使用）が特に最初の青色から水色、白色等に変色しており、また運転中絶縁アンプに触れると熱く感じられ、田口氏の判断では50℃以上になっているとのことであった。

⇒ この段階で、カード電圧の不安定等の不具合の原因は、絶縁アンプの不具合によるものと判断した。

・7日、予備のAVR01回路基板が所内にあることが確認されたので、基板ごと交換することにした。交換前の準備として、1. 絶縁アンプ I.AMP 1, 2（電圧、電流検出用）のハイス用抵抗 VR 1, 2, 4, 5 を、筐体内で使用中の基板のそれと合わせた。2. R113（時間遅れ設定用のコンデンサ（C1～4）と並列に入る抵抗、上記コンデンサの容量との積で時間遅れの時定数が設定される）の抵抗値を51 kΩ から1020 kΩ に変更した。以上の準備の後、回路基板の交換を行なった。

※以後、交換前の回路基板を AVR-01-a、交換後の物を AVR-01-b とする。

・9日10時20分頃から17時20分頃まで、カード電圧80 kV、デューティ600 μs × 50 pps で運転を行なった。運転開始直後、高圧直流電源部に付属する電圧メータの表示と、クライストロンタンク内の高圧プローブで検出した電圧値とを合わせるべく、VR1を調整した。AVR01回路およびサイリスタゲート回路

（APS01～06）の±15 V定電圧レギュレータIC（+用 MC7815、-用 MC7915）の出力を調べたところ、誤差の絶対値が最大で0.36 Vあったが、許容値と判断した。サイリスタアノード-カード間電圧波形をおロスコープでチェックしたところ、特に異常はみられなかった。約7時間運転したが、カード電圧は約1 kV減少しているのがみられた。この時のペンコーダの記録を図4-1、2に示す。

※今回の作業内容を日立・田口氏がまとめたものを資料1に示す。

※取り替えたAVR-01-aについては、高圧直流電源を設計、製作したトケン（株）へ送り、絶縁アンプ5個全てと定電圧レギュレータIC2個（AVR01および02）、ハイス用抵抗2個（VR1および2）の交換、および端子T2-1, 2間とT2-4, 5間にネジ止めしてあったダイオードの基板裏への半田付けを依頼した。

※※しかし後日、トケン（株）の技術者に確認したところ、交換した絶縁アンプには異常は見られなかった、との話であった。再度調査し、その結果を報告せよと言ったが、その結果についてはまだ連絡を受けていない。

12月14日、再度運転をして動作の確認を行った。この時のペンコーダの記録を図5-1～4に示す。立上げ時に高圧直流電源部に付属する電圧メータの表示と、クライストロンタンク内の高圧プローブで検出した電圧値との間に差異が見られ（20 kVで-6 kV、50 kVで-4 kV、しかし70 kV、80 kVではほぼ一致していた）、またクライストロンタンク内の高圧プローブで検出した電圧のレベルを長時間記録すると、不規則な増加、減少が見られた。前回の対策では修理ができていないことがわかった。

→ 11時20分頃から17時20分頃まで、デューティ600 μs × 50 pps で運転を行なった。図5-1、2より、開始時のカード電圧はほぼ83.3 kVであった。開始後約2時間30分経過するまで徐々に減少し（約0.3 kV）、それから約0.5 kV不連続な減少がみられた。それから約1時間50分の間に徐々に減少し（約0.2～0.3 kV）、それから約0.1～0.2 kV不連続に増加した。そして1時間強の間徐々に減少した後（ここまで開始後約5時間20分経過）、急激に3.5 kV以上減

少し、以後1時間10分の間電圧は不安定になった。特に急激な減少から約40分および約50分経過した時(開始後約6時間、および6時間10分経過)、インパルシ的な変動が見られ、その振幅は最大で14kVにまで達している。この変動のとき高圧受電盤の電圧の変動については確認できず、従って高圧直流電源自身の変動によるものかどうかは判断できない。その後(ここまで開始後約6時間30分経過)電圧は安定したが、値は78kVで、その後バルが回復する様子もなく、約20分後に終了した。

図5-3、4より、サイリスタ制御電圧、フィードバック電圧(絶縁アンプ出力電圧)、絶縁アンプ入力電圧について、とくにクリストロンカソード電圧が変動した箇所について比較すると、開始から約5時間20分経過後以降の変動については対応している。インパルシ的な変動箇所について比較すると、クリストロンカソード電圧、サイリスタ制御電圧はおもに減少する方向で変動しているのに対しフィードバック電圧、絶縁アンプの入力電圧は増加、減少両方向にほぼ均等に変動している。

また、図5-2において、高圧直流電源部の冷却水の温度上昇を記録したところ、電源印加時から終了時まで上昇を続けた。振動する波形のほぼ中心の値を目分量で見ると、開始から終了までに約2.2℃上昇していた。

3. 2月3日までの報告

12月20日、日立・電シ開・金澤氏に再度修理を依頼し、fax. で14日運転時に記録された各種波形を送った。fax. についてはトケン(株)からも問い合わせがあり、それについては26日に回答した。

次回の修理の日程について日立から回答が得られないまま年が明け、95年1月9日、再び日立・金澤氏に連絡した結果、23、24両日に来所して修理を行うことになった。この日となった主な理由は、前回の作業で取り外し、昨年中にトケン(株)へ送って部品の交換を依頼したAVR-01-aを持って来ることが出来るから、とのことであった。

⇒ この時点で、日立・金澤氏の意見は、94年12月7日に取り付けしたAVR-01-bにマッチングの問題があり、部品交換後のAVR-01-aを戻せば正常に動作するだろう、というものであった。これに対し、日立・EQA品証課・田口氏は、94年末に電話で聞いたところによると、絶縁油タンク内の電圧検出部に問題があると判断しており、絶縁油を抜いてタンクを開ける必要があると考えていた。KEK・小野氏も同じ意見であった。筆者は当時、両方の可能性があると思っていた。

1月23日、13時30分に日立・EQA品証課・長坂氏およびトケン(株)大西氏が来所。前日までの日立・田口氏からの要請で、午前中に電源の立ち上げを行った。クリストロン電源2号機が、1号機と比べて四極管onの開始時間が140 μ sも遅れ、その分パルス幅が短くなっていた。

13時30分から業者2名の作業が始まり、まず高圧直流電源の制御部の点検を行ったが、その作業中クローバ回路が動作し、クリストロン電源制御盤内のNIM-BIN電源の1台のDC+12V用電源の出力が出なくなり、またメータ表示用回路内の絶縁アンプ1個が破損した。小野氏と筆者はこれらの交換作業を行い、業者2名は高圧直流電源内の配線チェック等を行った。

配線チェックにより、以下の事が判明した。高圧直流電源部の電圧・電流測定用の配線は、昇圧トランス筐上板の電圧測定端子からツイスト線でAVR01回路の入力部の絶縁アンプ(図2-1参照)へつながっているが、クローバ動作時、あるいは測定用抵抗が短絡したときにこの大電流が流れて絶縁アンプが破損しないように図6-1のように1k Ω 、33k Ω の抵抗、さらに470VのZNRを挿入している(この件については日立が作成した『UHFパルスクリストロン電源現地試験報告書』に詳述。その一部を資料2に示す)。測定したところ、1k Ω の各抵抗の測定値が下記のような値になっており、特に電流測定部の抵抗が大きくなっていることがわかった。

電圧値検出回路の抵抗 … 1k Ω 、1W (2部) ⇒ 測定値、各々997 Ω 、2.305k Ω
33k Ω 、0.25W (1部) ⇒ 測定値、33.05k Ω

電流値検出回路の抵抗 … 1 k Ω 、1 W（2部）⇒測定値、各々 254 k Ω 、1.16 M Ω

このようになった原因は、クローバが動作して回路に大電流が流れたために抵抗器内部で接触不良のようなことが起こり、抵抗値が大きくなったのではないかと思われる。また、配線方法はケーブル、抵抗、ZNR等を半田付けしてビニールテープを巻き、空中に浮かせてあった。このような配線では端部で接触不良が起こることも十分考えられた。

⇒ 電圧測定用抵抗について定量的に評価すると、正常時は分圧抵抗の5 k Ω と33 k Ω との並列で4.34 k Ω 、接触不良のため33 k Ω が繋がっていない時（異常時）は5 k Ω となる。したがって、電圧が同じ値と測定される場合、実際の電圧は異常時は正常時の86.8%となる。これは測定結果と合致している。

⇒ ゆえに、不具合の原因はこの抵抗端子部の接触不良によるものと判断した。

翌日各種の対策を行うことにして、23日は60 kV運転時、および模擬入力時のAVR-01内の各部の電圧電流を測定した（測定結果は日立・長坂氏のまとめた資料（資料3）に詳述）。測定終了後、翌24日朝まで60 kV、50 ppsで電源の運転を行った。

※ただしこのとき、2号機のパルスが全く出なくなり、1号機のみ運転となった。

※カット電圧の変動は見られなかった。

1月24日午前より修理を行った。概要はつぎのとおり。

・1 k Ω 、33 k Ω の各抵抗をすべて交換した。特に33 k Ω は1/4 Wのものを1 k Ω と同じく1 Wのものにした。

・抵抗器とケーブルとの接触は、接触不良を避けるため端部に圧着端子を取り付け、電源きょう体内の未使用の端子台にシジ止めした。

これらについての詳細は資料3参照。

修理終了後80 kV、50 ppsで電源の運転を行った（開始時刻13時28分、終了時刻翌25日19時31分。ただし、1号機のみ）。クイストン電源1号機まわりの各種波形の1部を図7-1に示す。途中、約3時間40分程、冷凍機の故障で冷却水の温度が上昇して、温度インロックにより電源が停止したが、復帰後も含めカット電圧は安定していた。高圧直流電源部の冷却水の温度上昇を図7-2に示す。運転開始より終了までの冷却水温の上昇は、約0.9℃となった。

1月26日から31日にかけて、クイストン電源2号機のパルス発生部について調査を行ったところ、回路素子の破損は見られなかった。前回の運転で2号機のパルスが発生しなかったのは、モジュール間をつなぐケーブル、またはモジュール内のケーブルの接触不良によるものと思われる。

2月1日、クイストン電源1、2号機並列の試験運転を行った。その時の各種波形を図8-1に示す。運転開始より約6時間30分後（途中約15分中断）カット電圧が減少を始め、その後不安定となり、前回の対策では修理が十分に行われていないことがわかった。

→ 運転開始から6時間30分の間に0.8 kV程度の減少が見られた。それから、急に3.2 kVほど減少し、そこで15分ほどやや安定したが、その後3 kVほど減少した。以後25分程度様子を見たが、電圧は最初の値まで回復せず、また安定もしなくなった。それから（開始後約7時間10分経過）カット電圧を高圧直流電源部のメータで50 kVに合わせたが、変更直後は電圧値が安定せず、5分程してからやや安定したものの運転開始時より2 kVほど低くなっていた。その後（開始後約7時間40分経過）繰返しを50 ppsから40 ppsに下げ、カット電圧を高圧直流電源部のメータで80 kVにしたが、運転開始時のカット電圧値には達しなかった（最大で約5 kV低かった）。約10分後に運転を終了した（開始後約7時間50分経過）。

高圧直流電源部の冷却水の温度上昇は約 2.5℃と観測される。

運転終了直後、電圧フィードバック回路上の、先日取り替えた抵抗 (1kΩ 2部、33kΩ 1部)、および端子から見たタンク内分圧抵抗の、抵抗値をそれぞれ測定した。測定結果は以下のとおり。

抵抗 1kΩ 2部	: 1000 Ω、997 Ω
抵抗 33kΩ	: 32.8 kΩ
端子から見た	
タンク内分圧抵抗 5kΩ	: 7.93 kΩ

⇒ 1kΩ、33kΩ の各抵抗値は正常。タンク内分圧抵抗が増加している。この変化により、検出される電圧値が増加しているようである。しかし定量的に評価すると、電圧の変動の割合が最大でも 10% 未満であるのに対し、抵抗の増加は約 60% であり、抵抗の増加の割合が大きすぎる。

2月2日 15時頃から3日 17時30分頃にかけて、再度連続運転を行った。同時に高圧直流電源部のマスターコントロール回路の各箇所の電圧値をペンソコーダに記録し、同回路の入力波形をオシロスコープにて観測することにした。図8-2にオシロスコープの波形の撮影結果を示す。入力信号波形にピーク・ピーク値約2kV、周期2msのリップルがのっているのがわかる。この波形は運転中ほとんど変わらなかった。図8-3および図8-4にペンソコーダで記録された各種波形を示す。

→ はじめ 80kV、50pps で運転。開始から7時間10分の間 (途中2号機のインバータ電流が振れて約25分中断) に1kV余り減少。それから急に約3kV減少してしばらく±1kVの範囲で細かく振動。急に12kV程度減少してすぐに6kVほど増加、さらに10分ほどかけて1kV増加 (この時点で開始から7時間30分経過、電圧値は運転開始時よりも約8kV少ない)。それから約2時間45分の間、不安定ながら0.5kV以内の範囲で推移、その後 (この時点で10時間15分経過) 電圧が3kVと少し程度上昇、それから約3時間30分の間、不安定ながら0.5kV以内の範囲で推移した (この時点で開始から13時間45分経過、電圧値は運転開始時よりも約5kV少ない)。

このころ冷凍機が停止。その影響で冷却水の温度が上昇し、インロックがかかって電源がoffとなった。深夜勤に当たっていた筆者が見つかり、電源がoffとなってから約2時間30分後に復帰した (この時点で開始から15時間15分経過、電圧値は運転開始時よりも約4kV少ない)。それから約3時間10分の間、不安定ながら0.5kV以内の範囲で推移し、再び冷凍機停止の影響で電源がoffとなった (この時点で開始から18時間25分経過)。

約50分後に復帰、はじめの1時間15分の間は繰り返しを減らして20ppsで運転、電圧は安定していた (電圧値は運転開始時よりも約1kV少ない)。それから (この時点で開始から20時間30分経過) 後の6時間は電圧が安定していた。

運転による高圧直流電源部の冷却水の温度上昇は約4.0℃と観測される。

図8-4より、フィードバック電圧が振れた時刻とカード電圧が変動した時刻とが一致しており、AVRが動作しているのが確認される。電圧パターン信号は一定のまま。

運転終了直後に、前々日の運転終了直後と同じように端子からみたタンク内分圧抵抗を測定した。その結果、下記のような極性がみられた。

分圧抵抗のグランド側端子がPS端子、-側端子がNS端子であるが、

- ・テスターの+端子をPS端子に、-端子をNS端子に接続して抵抗を測定した時
… 5.00kΩで一定
- ・テスターの+端子をNS端子に、-端子をPS端子に接続して抵抗を測定した時
… 4.73～4.81kΩと時間とともに徐々に増加
- ・別のデジタルマルチメータで測定した場合も、ほぼ同じ結果が得られた。

※停止状態で3日後（土、日曜日をはさむ）、6日（月）朝に再び抵抗値を測定した結果、 μ の+端子をPS端子に接続した場合も、NS端子に接続した場合もともに4.87k Ω と測定された。

⇒ 上記の結果からみると、分圧抵抗に直列に容量が存在しているように見える。これは抵抗の端子の接触の接触不良が原因となっているのか？

⇒ 高圧直流電源部まわりの回路図を図8-5に示す。図より、電圧検出用分圧抵抗（R4、5k Ω ）からみて負荷側にシャント抵抗1 Ω （SHT.）が入っている。この抵抗自身、または抵抗端子の接触不良が、電圧不安定の原因になっている可能性もある。

4. 最終的な修理

KEK・上野氏と日立、トケン担当者との間で日程の調整が行われ、2月16～17日に高圧直流電源のタンク部の絶縁油抜き取り、タンク内回路の修理、復旧、2月18～19日に試験運転を行うことになった。

作業に先立ち、KEK・久保田氏と筆者が高圧直流部（高圧直流電源部に高圧受電盤、降圧トランス、平滑コンデンサを加えた、フェンスに囲まれた部分）の内部の清掃を行った（電源が設置されて初めての清掃）。

また、トケンから絶縁油の抜き取り・タンクへの注入の際に必要な真空浄油機を持ち込む、との連絡を受け、この装置の電源として3 ϕ 220V 150A程度が必要、とのことであった。この容量を満たす配電盤はUHFクライストロ電源の3 ϕ 220V用配電盤のみであった（アセンブリホール内の他の配電盤からとるのは容量の点で不可能であった）。

2月16日、日立・EQA品証課・田口氏、トケン・玉置氏（製造）、トケン・筈井氏（技術）、橋里重量（株）荒居氏、横山氏の計5名来所。搬入した主な物品は、

- ・真空浄油機、ドラム缶3個
- ・電圧・電流検出用抵抗器（取り替え用、5k Ω 25W、100M Ω 125W、1.0 Ω 100W各1部）
- ・倍率器（タンク内部の修理によって電圧の安定化が達成出来なかった場合、高圧直流電源出力から出ている高圧ケーブルの途中で挿入して電圧を検出するために用意した）

9時すぎから作業開始。物品の搬入、真空浄油機の電源ケーブル配線、絶縁油の抜き取り等を行い、12時過ぎ頃タンク内部回路の引き上げを行い、絶縁油の垂れるのを待って13時過ぎから内部回路をタンク外へ運搬・設置し、修理を開始した。図8-6に作業時に撮影した写真を添付する。

目視によるケーブル・回路素子の点検、接続部締め付け具合の点検、電圧・電流検出用抵抗器の抵抗値の測定等を行ったが、異常は見られなかった。

電圧・電流検出用抵抗器については、予備品があったので全て取り替えた。また、配線を少し変更し、電圧検出用抵抗の配線場所を直流リアクトル（DCL）および電流検出用抵抗（1.0 Ω 、SHT）よりも負荷に近いほうに変更した（図8-7参照）。

⇒ 電流検出用抵抗等で電圧が下がる分、検出される電圧と出力電圧との間に誤差が生ずる。電流検出用抵抗等の値が異常に大きくなった場合、その誤差が大きくなり、出力電圧の正確な測定が妨げられる要因となる。したがって、このようなことを避けるため上記のように配線を変更した。

5k Ω 抵抗の端子には黄銅ニッケルメッキの円筒型金具が半田付けしてあり、回路にはその金具の部分でU字型の金具にはめ込むことによって接続している。この部分で接触不良が生じる可能性があるため、抵抗の円筒型金具に7 μ 線を半田付けして接触部を補強することを試みた。

上記の作業が終了した後、低電圧を印加して試験を行った。すると、5k Ω 抵抗の両端に5V程度の電圧を印加した時の抵抗値は10k Ω となり、20Vまで印加すると5k Ω となった。電圧を印加せずに

測定した場合は 10 k Ω であった。これは、半田付けをした際に抵抗体のカーボンと黄銅ニッケルメッキ金具との間に接触不良が生じたためと考えられ、また印加する電圧の値によりその抵抗値に変化が生じることがわかった。他の抵抗は異常がなかった。

これまで使用した 5 k Ω 抵抗の容量は 25 W で、油中に配線していたが、この抵抗で消費される電力を検討した結果、容量 1 W の 3 本 \parallel で十分であり（※）、今後のメンテナンスも考慮して、油中の 5 k Ω 抵抗を取り外し、代わりにタンク外側で、上蓋端子部に 15 k Ω 1 W の金属皮膜抵抗を 3 本 \parallel にして圧着端子で取り付けることにした（小野氏によると、トリスラの電源でもこの程度の容量の抵抗を使用しているとのことであった）。

※ クライストンの最大定格値 93 kV をカソードに印加した場合について考えると、図 8-7 の回路図より、5 k Ω + 100 M Ω に流れる電流値は 0.93 mA、したがって 5 k Ω の抵抗で消費される電力は 4.32 mW となる。

ちなみに、カソード電圧が 80 kV（RFQ の運転でよく使用される電圧値）の場合は、5 k Ω で消費される電力は 3.20 mW となる。

タンク内回路についての作業終了後、再びタンクに回路を戻した。その際種々のパッキン類の交換も同時に行った（油漏れが見られたのでその対策のため）。

17 日朝から絶縁油のタンク内への注入、高圧ケーブルの接続等の復旧作業を行い、終了後夕刻にトケン・百田氏（検査）来所、16 時から約 1 時間 30 分程度大電力試験を行い（600 μ s、10 pps、カソード電圧 10 kV ~ 30 kV へ徐々に増加）、異常はなかった。カソード電圧を増加させるとき、手動トリガムの作動に比べて電圧の変化が遅くなったため、AVR 回路のダンピング定数（図 2-2 参照）を 3.52 μ F から 2.52 μ F へ減らした（デバッグ・スイッチの OFF による）。17 時 30 分頃運転停止（本格的な電源の運転までに、絶縁油の出し入れの際に紛れ込んだ気泡が自然にタンク上部に上がってくるまで待つ必要がある、とのこと。したがって、600 μ s、50 pps、カソード電圧 80 kV での運転を行うのは絶縁油注入から 24 時間後、すなわち翌 18 日午後からとした。）

18 日朝から大電力試験再開。メーカーの立ち合いは日立・田口氏、トケン・百田氏。午前中カソード電圧および繰り返しを徐々に増加させて運転を行った（30 kV \rightarrow 40 \rightarrow 50 \rightarrow 60 kV、10 pps \rightarrow 50 pps）。午後一旦停止し、油中マイク（タンク内部での放電を観測するため）を取り付けた後運転を再開、13 時 55 分からカソード電圧 80 kV（600 μ s、50 pps）で連続運転を試みた。タンク内部での放電は観測されなかった。図 8-8 にペンコーダで記録された各種波形を示す。9 時間 20 分の間カソード電圧は安定しており、冷凍機停止の影響で電源が off となった（時刻は 23 時 20 分頃と推測される）。この間の高圧直流電源部の冷却水の温度上昇は約 3.2 $^{\circ}$ C と観測される。

19 日午前から設定値を同じにして運転を再開。11 時間 50 分の間、カソード電圧は安定していた。22 時 11 分運転終了（小野氏が電源 off）。この間の高圧直流電源部の冷却水の温度上昇は約 3.0 $^{\circ}$ C と観測される。

※今回の作業内容を日立・田口氏がまとめたものを資料 4 に示す。

5. 考察、結言

今回不具合の発生した、このトケン（株）製の高圧直流電源については、設計段階での（株）日立製作所・日立工場との打ち合わせでの資料もあまり無く、KEK 側としても未知の部分が多く、日立やトケンに来てもらって修理をさせるより仕方がないという面があった。しかし、最初に不具合がみられたのが昨年 8 月であったから、12 月までの間に試運転を行っていればもっと早い段階で修理が終わっていたので、この点は筆者の不手際であった。

今後同じ様な現象が起こった場合、まず 1. 今回取り替えた抵抗の抵抗値を測定し、大きく変化していた場合はそれらを取り替えて様子を見る、という手順が考えられる。もしそれでも不具合が生じた場合は、2. 予備の AVR01 回路基板と交換して様子を見る、それでも不具合が生じた場合は 3. 業者を

呼ぶ、ということになる。

今回見られた種々の現象で現在筆者がまだよくわかっていないものを2つ挙げておく。1つは図8-7にみられるようなリップルが起こる原因について、そして現在のように電圧測定用抵抗を交換した後はこの現象がみられるかどうか。これは次回運転するときに見ておくべきことと考える。2つめは、カソード電圧 80 kV、600 μ s、50 pps で連続運転すると、高圧直流電源の冷却水は上昇を続けているが、このまま長時間（1週間以上）運転を続けるとどうなるかということ。もし上昇を続けるとすれば、オイルツクの温度計のメーターでインロックをかけるしかないようである。冷却水量を増やすにも、タンク内の冷却水管の径で制約されると思われる。

最後に、今回の修理に際しては、特に上野氏、加藤（隆）氏にご迷惑をおかけし、またいろいろご協力いただきました。この場を借りてお礼とお詫びを申し上げます。

以上

高エネルギー物理学研究所殿

UHFパルスクライストロン電源調査結果報告書

平成 6年12月 9日

(株)日立製作所 日立工場

EQA品証課 田口 敏朗

1. 現象

12月1日～2日の出力電圧70kVの連続運転(実験)において出力電圧が64～81kV(短時間には84kV)まで変動した。

2. 調査結果

(1) 12月6日12時～7日18時まで70kV連続運転を行い出力電圧の変動を記録計にて確認した。6日16時頃約30分間67kV程度に低下したがその他は比較的安定運転していてAVR系の不安定原因を追及することができませんでした。

(2) 原因としては、AVR系のデバイス(I・AMP1、VR1、VR2)の不具合によるものと推定致します。

(3) プリント基板AVR-01内のI・AMP3～5が変色し更に表面温度も高く(50℃以上)なっておりました。

(4) サイリスタA-K間電圧波形をシンクロスコープにてチェックしたが特に異常は有りません。

3. 対策

(1) プリント基板AVR-01を予備品と差替えました。

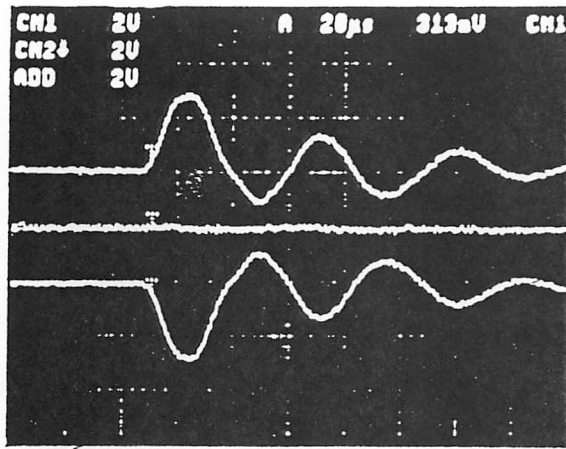
(2) 9日10時から80kVにて連続を実施、AVR-01内の各部の電圧を記録計にて確認した。

(3) このままご使用し、実験運転にて記録計の変動などをご確認下さい。

4. プリント基板AVR-01の修理について

(株)トクデン大西宛に返送して下さい。

費用の支払等については直接コンタクト願います。



測定条件は図4-2と同じ

図4-4 電圧FB. ノイズ

(3) 本対策

- (a) 仮対策(a)はそのまま実施
- (b) 図4-1と図4-2の比較からノイズフィルタ追加はむしろ逆効果と考えられる。ノイズフィルタは除去する。
- (c) $2\mu\text{F}$ と 3.3Ω のCRも除去する。
- (d) 信号ラインに直列抵抗 ($1\text{k}\Omega \times 2$ 個) を追加し、絶縁アンプ入力とアース間をZNR (470V) でクランプする。
絶縁アンプ入力にツェナーダイオード (10V) を追加しノーマルモードノイズをクランプする。

(下図参照、電流信号、電圧信号共に対策実施)

(4) 本対策効果確認試験

- (a) 10kV クローバ試験 異常なし (図5-1)
- (b) 20kV クローバ試験 異常なし (図5-2)
- (c) 40kV クローバ試験 異常なし (図5-3)
- (d) 60kV クローバ試験 異常なし (図5-4)
- (e) 80kV クローバ試験 異常なし (図5-5)

イグナイトロンのエージングが充分でないこともあり、電圧印加は 80kV までとした。

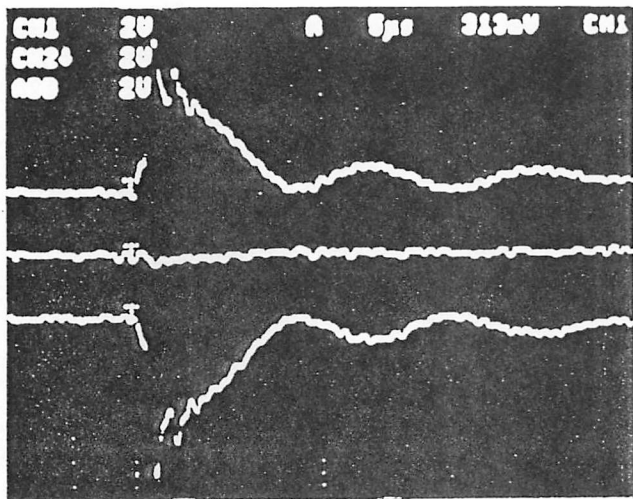


图 5-1 10kV 70-11° 时

纵: 200V/div
横: 5µs/div

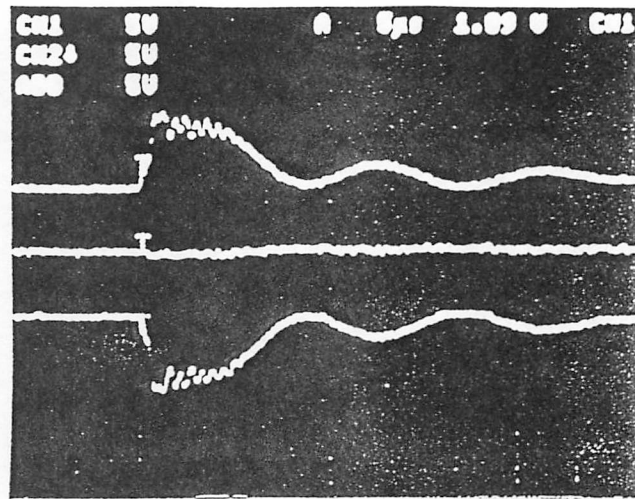


图 5-2 20kV 70-11° 时

纵: 500V/div
横: 5µs/div

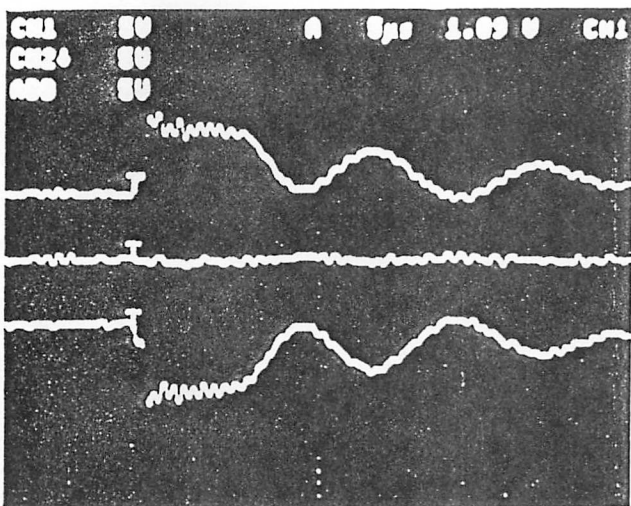


图 5-3 40kV 70-11° 时

纵: 500V/div
横: 5µs/div

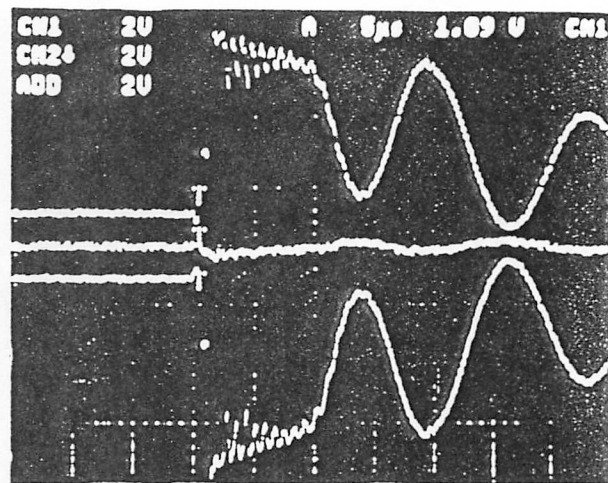


图 5-4 60kV 70-11° 时

纵: 200V/div
横: 5µs/div

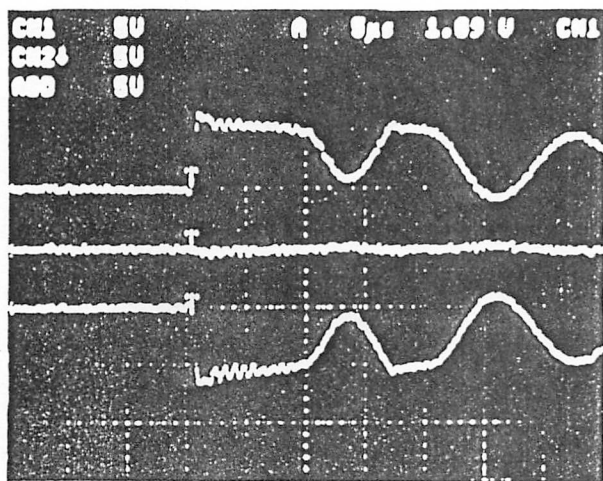
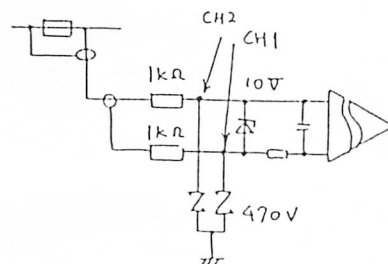


图 5-5 80kV 70-11° 时

纵: 500V/div
横: 5µs/div

← 70-11°
波形



上: CH1
下: CH2 (反转)
中: CH1-CH2

配布先	部数
顧客	
SR設	
電シ開	
UPS設	
SR製	
EQ A	

顧客名 高エネルギー物理学研究所 殿

品名 UHFパルスクライストロン

題名 高圧直流電源出力電圧変動

調査報告書

平成 7 年 1 月 24 日

機器仕様
110KV 3A
330KW
518510-3

御立会者

顧客

川村 真人

(株)日立製作所日立工場 パワーエレクトロニクス品質保証課
日立エンジニアリングサービス整流器グループ
トクテン(株)

長坂 三郎
大西 武

1. 作業内容

- 1) 60KV運転中制御系電圧測定 良
- 2) 電圧電流FB回路抵抗値の測定 不良
- 3) " の特性チェック 良
- 4) " 抵抗器交換 (1kΩ 1W x 4本, 33kΩ 1W x 1)

2. 結果

- 1) 電圧電流FB回路の抵抗器の抵抗値が変化していた。
電圧FB 1kΩ 1W x 2 997^Ω, 2.305kΩ
33kΩ 0.25W 33.05kΩ
電流FB 1kΩ 1W x 2 254kΩ, 1.16MΩ
- 2) 上記抵抗器を支給していたとき電線に取付ビニールテープで絶縁する作業法を改め、空き端子台に抵抗器を取付け仮配線とした。33kΩは0.25Wを1Wに変更
- 3) 電圧変動は33kΩの接触不良が発生すると、今回のような現象となります。取付方法および抵抗器を交換したことで様子見て下さい。
- 4) 同上抵抗器の容量upも検討させて下さい。
V30, 31 に作業、調査と必要となりましたら御連絡致します。

3. その他

- 1) 修理した AVR-01 の単品チェック方法 | 別途報告書を
- 2) 取外した Amp の特性調査結果 | 提出致します。
- 3) 測定データは別紙を御参照下さい。

プリント基板電圧調査

1. 運転時

	抵抗交換前	抵抗交換後	
電圧 F.B (AMP入力)	2.7 V	2.708 V	3.623 V
" (AMP出力) (A)	-2.99 V	-2.986 V	-3.992 V
電圧指令 (N)	-3.09 V	-3.097 V	—
電圧計	60 kΩ	60 kΩ	80 kΩ
電流 F.B (AMP入力)	0.56 V	0.64 V	1.09 V
" (AMP出力) (C)	-0.66 V	-0.66 V	-1.116 V
電流計	0.7 A	0.7 A	1.1 A
高圧電盤 電圧	6.6 kV	6.6 kV	6.6 kV
電流	8 A	8 A	14 A

2. 模擬入力時 (Ⓐ 交換前, Ⓑ 交換後)

① FB電圧 (電圧検出): 0V 1V 2V 2.7V 3V 4V 5V

電圧 F.B (AMP入力)	$\frac{1.01mV}{1.02mV}$	$\frac{1.025V}{1.004V}$	$\frac{2.001V}{2.006V}$	$\frac{2.709V}{2.710V}$	$\frac{3.007V}{3.010V}$	$\frac{4.004V}{4.001V}$	$\frac{5.003V}{5.05V}$
" (AMP出力) (A)	$\frac{-14.4mV}{-14.4mV}$	$\frac{-1.117V}{-1.115V}$	$\frac{-2.211V}{-2.21V}$	$\frac{-2.989V}{-2.987V}$	$\frac{-3.318V}{-3.32V}$	$\frac{-4.444V}{-4.41V}$	$\frac{-5.512V}{-5.56V}$
電圧計	$\frac{0k\Omega}{0k\Omega}$	$\frac{22.5k\Omega}{23k\Omega}$	$\frac{45k\Omega}{45k\Omega}$	$\frac{60k\Omega}{60k\Omega}$	$\frac{67k\Omega}{67k\Omega}$	$\frac{88k\Omega}{88k\Omega}$	$\frac{110k\Omega}{111k\Omega}$

② FB電圧 (電流検出)

電流 F.B (AMP入力)	0V	1V	2V	3V
" (AMP出力) (C)	-0.001V	$\frac{0.889V}{1.000V}$	$\frac{1.774V}{2.004V}$	$\frac{2.714V}{3.028V}$
電流計	0.05A	$\frac{1.05A}{1.0A}$	$\frac{2.0A}{2.0A}$	$\frac{3.05A}{3.0A}$

高エネルギー物理学研究所殿

UHFパルスクライストロン電源調査及び対策作業報告書-2

平成 7年2月20日

(株)日立製作所 日立工場

EQA品証課 田口 敏朗

1. 現象及び作業経緯

- (1) 12月1日~2日の出力電圧70kVの連続運転(実験)において出力電圧が64~81kV(短時間には84kV)まで変動する現象が発生し、12月9日プリント基板AVR-01を予備品と交換した。
- (2) その後も、同様の出力電圧の変動(電圧低下)が発生した、AVR回路各部の記録計によるデータから直流電源内部に取り付けられているAVR検出回路(抵抗器100MΩ+5kΩ)の接触不良等による抵抗値の変化に起因するものと判断されたため、今回直流電源内部を点検すること及び抵抗器を代品と交換する作業を実施した。

2. 作業内容

- (1) 2月16日10時~油抜き作業、12時中身吊り上げ
- (2) 抵抗器の外観点検、回路の締め付け点検、100MΩ抵抗器の交換、AVR検出回路の接続点の変更(抵抗器の挿入点を整流器端より出力端子に移動…KEK殿のご指示による)、各部の点検
- (3) 17時~中身をタンクに戻し、18時~-1.5kg/cm²にて真空引き
- (4) 17日9時~11時注油作業
- (5) 16時~17時30分、10kV~30kVにて運転

3. 運転確認作業

- (1) 18日9時40分、30kVにて運転
- (2) 14時~23時、80kV 2.35Aにて連続運転……DCVの変動なし
- (3) 19日10時30分~22時、80kV 2.35A連続運転……同上

備考: AVR回路のダンピング定数 $C=0.1+0.22+1.0+2.2\mu F \rightarrow 0.1+0.22+2.2\mu F$
に変更した。

4. 点検結果

- (1) 電圧検出用抵抗器は外観及び抵抗値に異常は認められませんでした、また回路の接触不良等も有りませんでした。
- (2) 5kΩ抵抗器は、端子部に半田ごてにて電線を半田付けした際に抵抗値が5kΩから10kΩに変化した現象が有りました、この抵抗器は端子部に5V程度の電圧を印加しても抵抗値はあまり下がらず、20Vまで印加したのち5kΩに復帰しました、原因は端末におけるカーボンと端子金具との接触不良が発生したものです。
- (3) 5kΩ抵抗器は、25Wの定格値に対して5mW(端子電圧は5V以下)にて使用しているので、タンク内の油温上昇等により接触抵抗の増加の発生も考えられますので、今後のメンテナンスも考慮しタンクの外(上蓋端子部)に1Wの15kΩ3pを取り付けました。

大変ご迷惑をお掛け致してきましたが、上記の運転確認にて異常現象は発生して折りません、現状にて様子を見て頂きたくお願い申し上げます。

今回の作業に際し種々ご協力を頂き有がとうございました、今後ともご指導のほどよろしくお願い申し上げます。

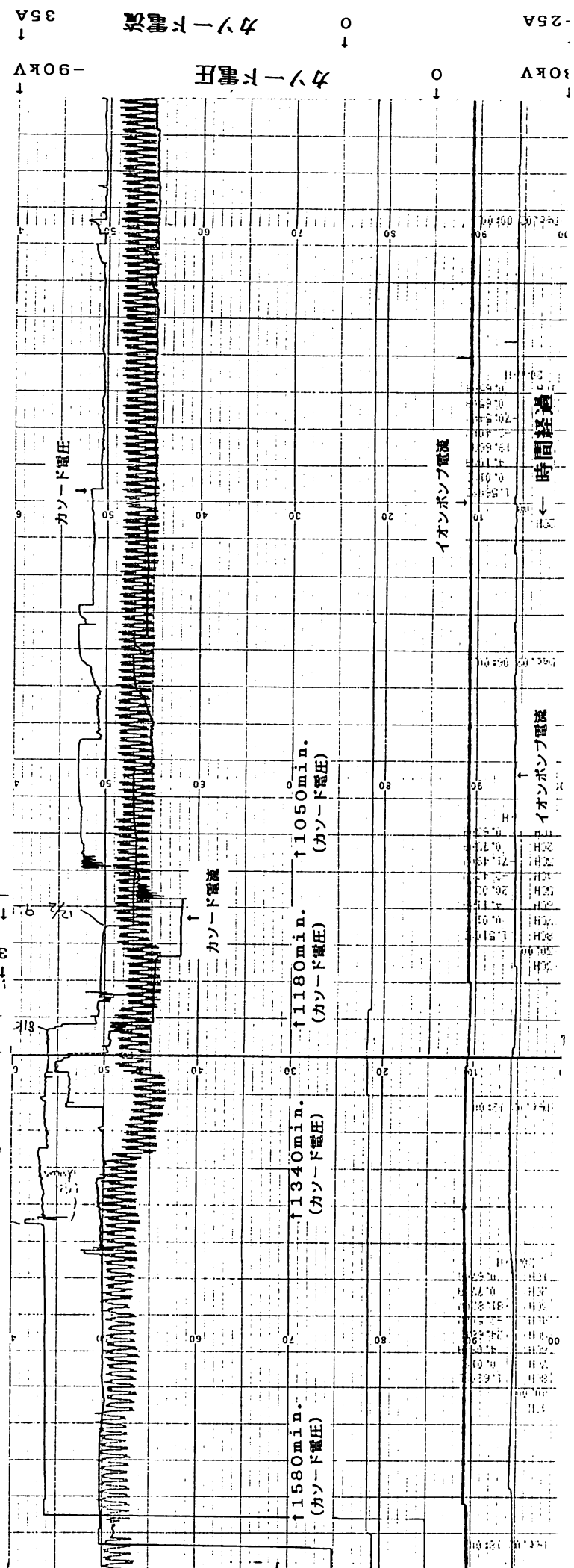
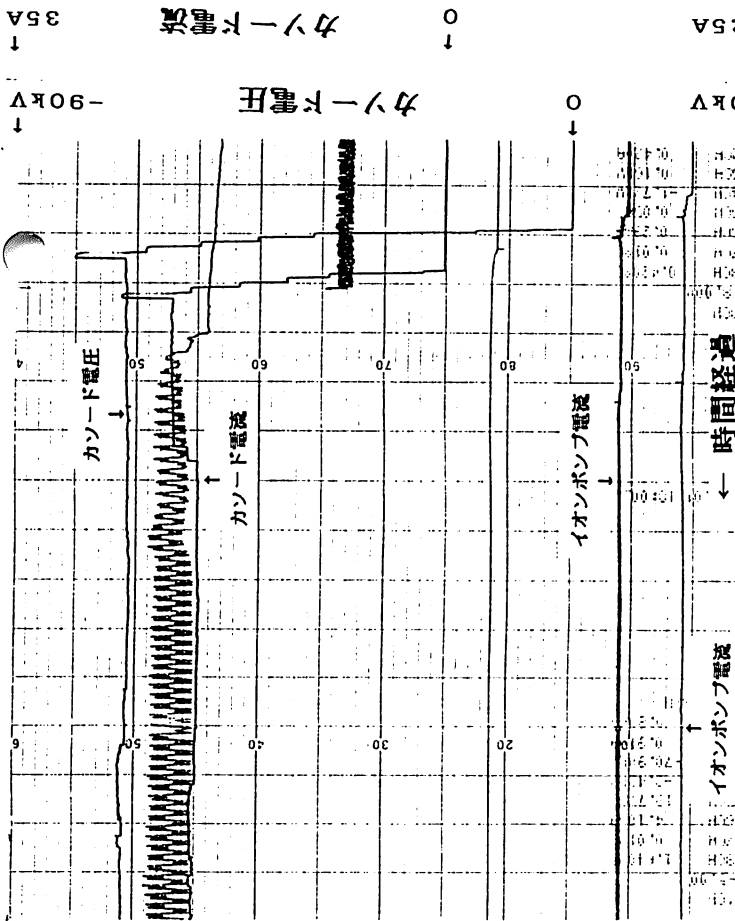
図1-1

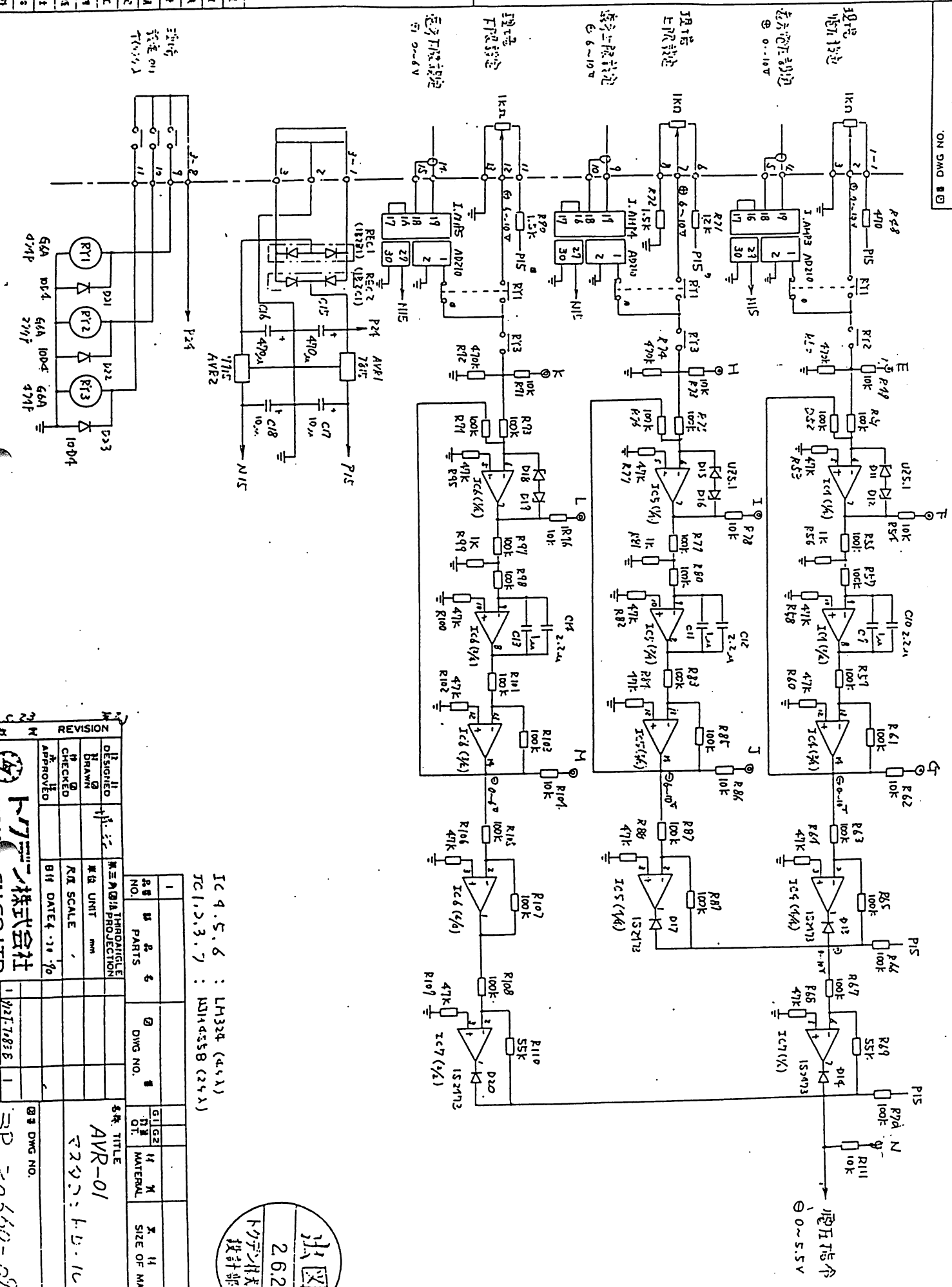
1号機

カソード電圧・電流等

941201~02

2div./hour





REVISION		DESIGNED		DRAWN		CHECKED		APPROVED	
1									

IC 4.5.6 : LH324 (4.5A)	IC 1.2.3.7 : LM114.55B (2.5A)
-------------------------	-------------------------------

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
品番	数量	部材	単位	寸法	材料	加工	検査	保管	廃棄
品名	数量	部材	単位	寸法	材料	加工	検査	保管	廃棄

品名	数量	部材	単位	寸法	材料	加工	検査	保管	廃棄
品名	数量	部材	単位	寸法	材料	加工	検査	保管	廃棄



図3-1

1号機

カソード電圧・電流等

941206~07

2div./hour

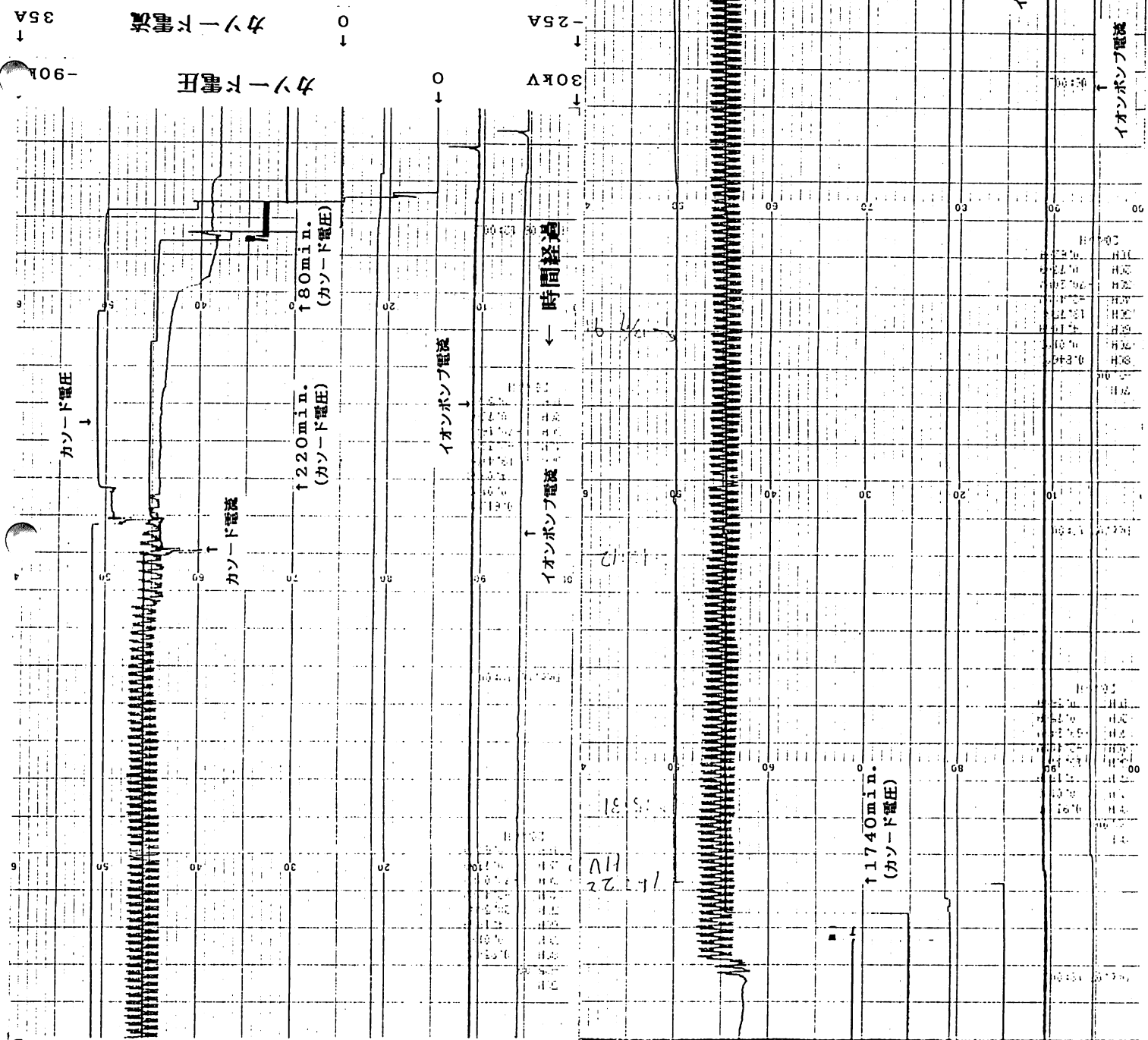


図3-2

2号機

カソード電圧・電流等

941206~07

2div./hour

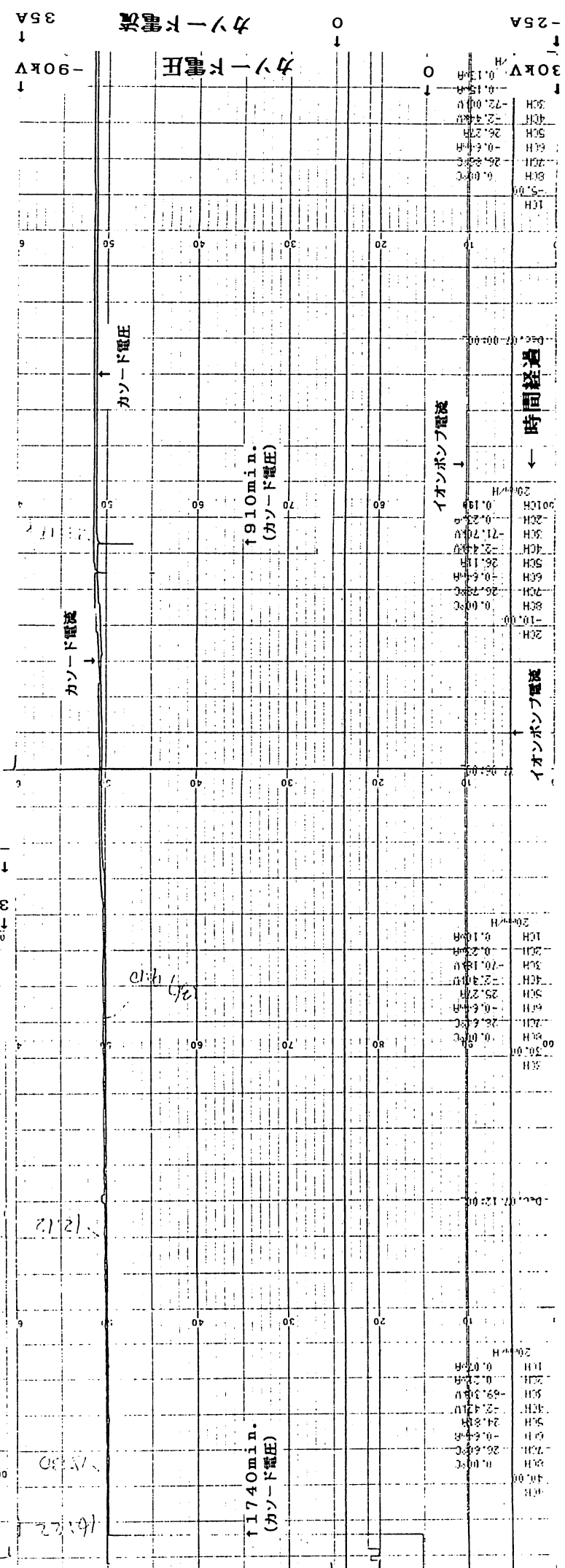
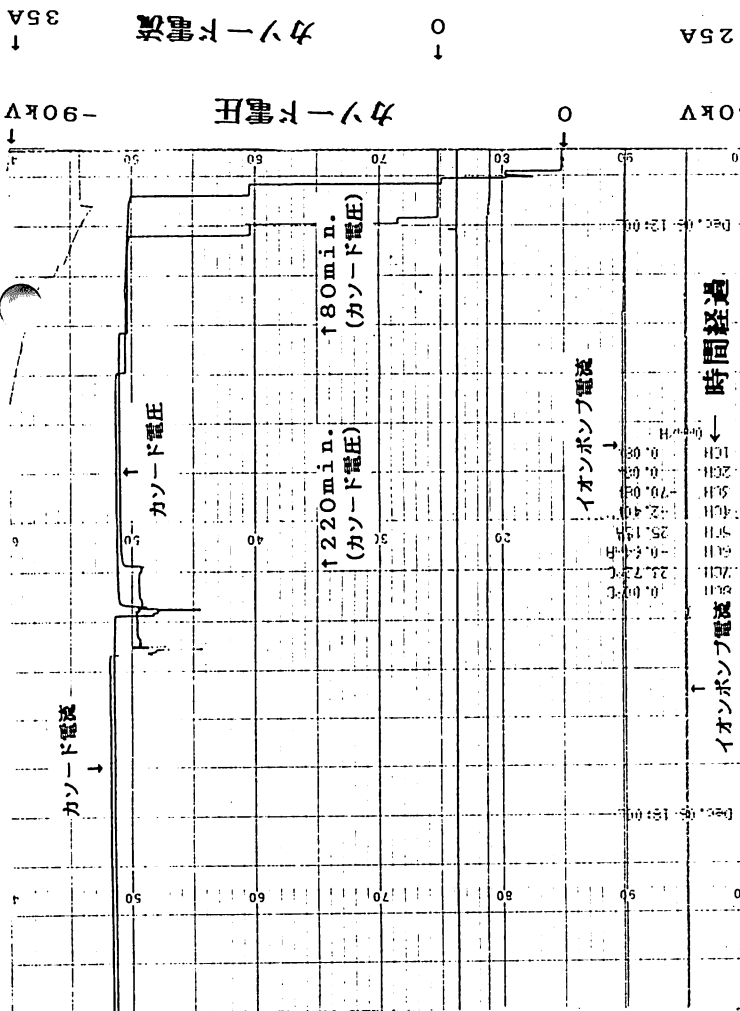


図3-3

AVR 盤制御回路基板内各種波形

941206~07

※信号の取り出し部分については図2-2を参照

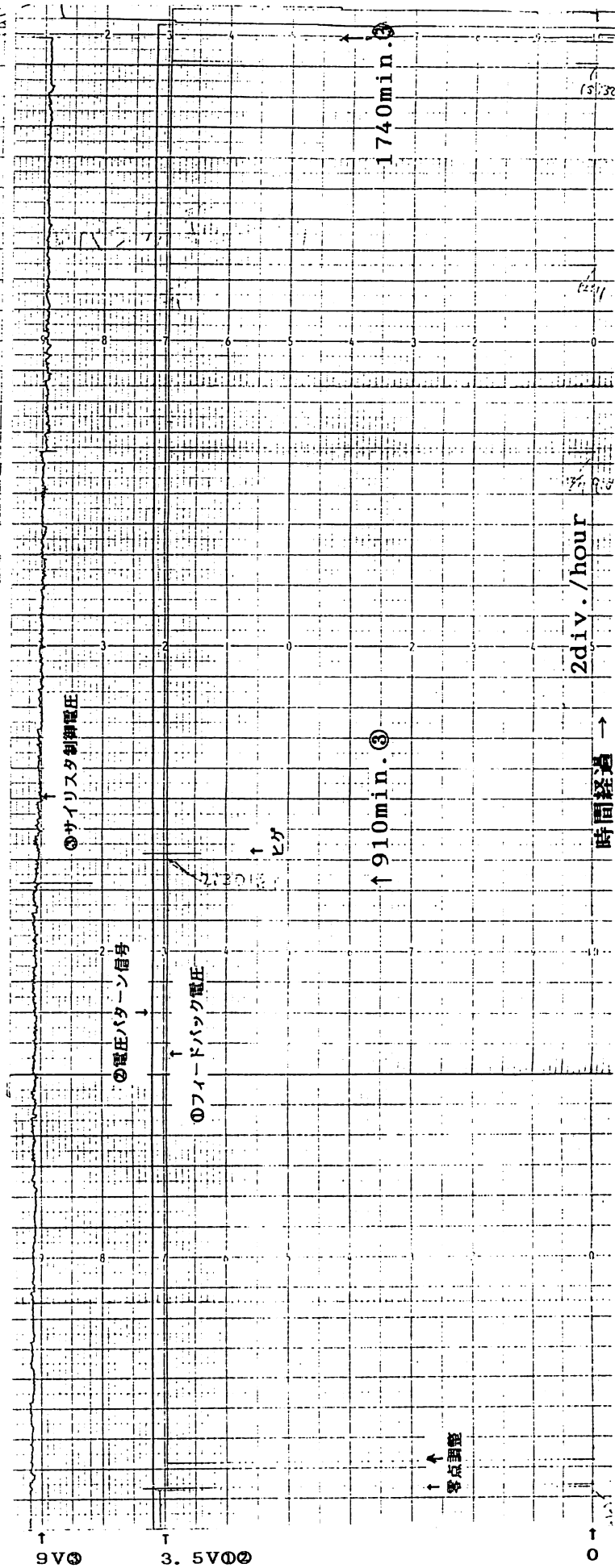
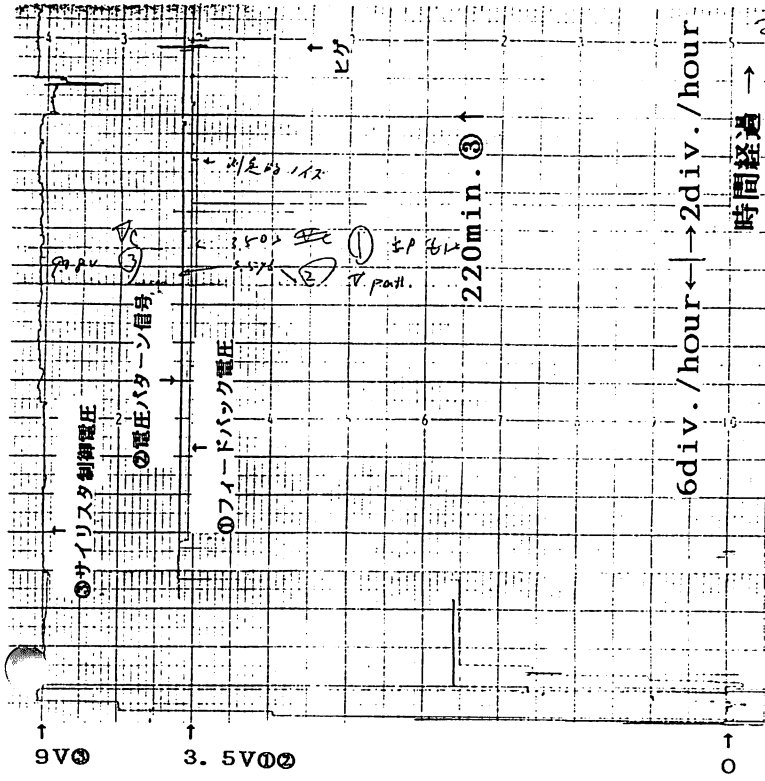


図3-4

絶縁アンプ入力・出力

941206~07

2div./hour

*信号の取り出し部分については図2-2を参照

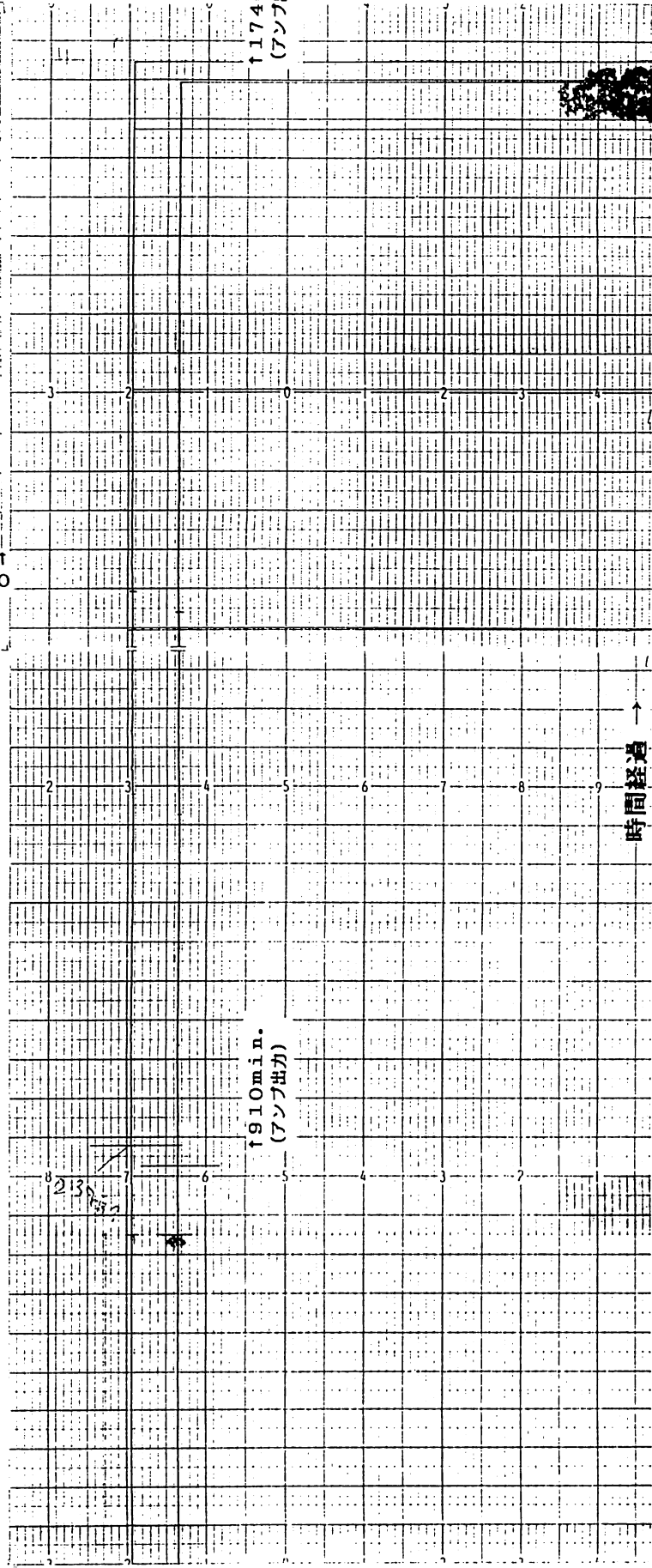
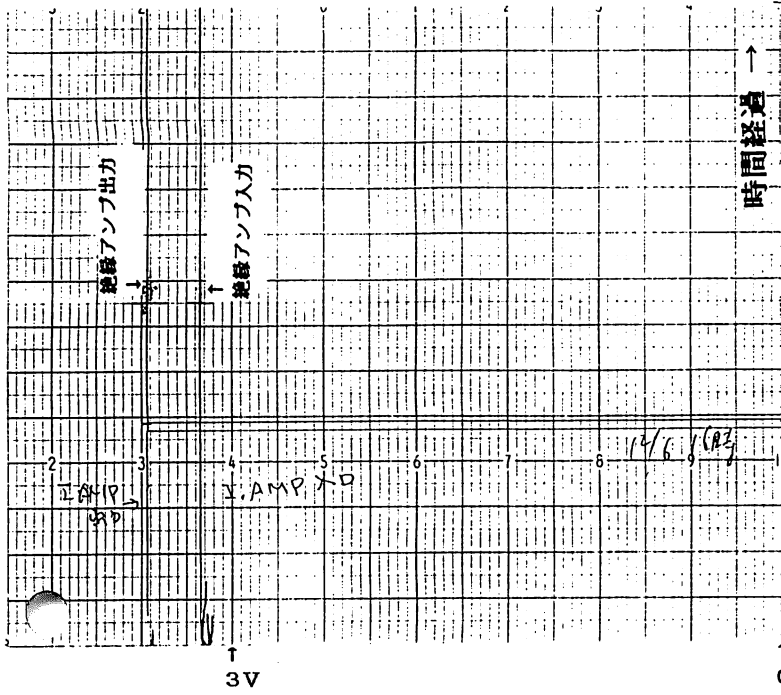


図4-1

1185cm

CHART NO. 89585AH

YOKOGAWA

1号機 カソード電圧・電流等 941209

9C
3.00

7.5A (カソード電流)

-170kV (カソード電圧)

2div./hour

(Kly.#1)

179

14:50

102.00

カソード電圧

カソード電流

イオンポンプ電流

イオンポンプ電流

Dec. 09 18:00

9CH	10
10CH	10
11CH	10
12CH	10
13CH	10
14CH	10
15CH	10
16CH	10
17CH	10
18CH	10
19CH	10
20CH	10
21CH	10
22CH	10
23CH	10
24CH	10
25CH	10
26CH	10
27CH	10
28CH	10
29CH	10
30CH	10

Dec. 09 12:00

-2.5A (カソード電流)

10CH 1.248V
11CH 1.102V
12CH 1.014V

13CH 1.107V
14CH 2.510V
15CH 7.487V
16CH 7.269V
17CH 7.209V
18CH 7.209V
19CH 7.209V
20CH 7.209V
21CH 7.209V
22CH 7.209V
23CH 7.209V
24CH 7.209V
25CH 7.209V
26CH 7.209V
27CH 7.209V
28CH 7.209V
29CH 7.209V
30CH 7.209V

0 (カソード電流)

0 (カソード電圧)

0 (カソード電流)

0 (カソード電圧)

時間経過

1890cm

図4-2

2号機 カソード電圧・電流等 941209

1500cm

CHART NO. ②

75A (カソード電流)

KV
-160.00

KV
-170.00

dy #2

2div./hour

カソード電流

カソード電圧

イオンポンプ電流

イオンポンプ電流

時間経過

-25A (カソード電流)

30KV (カソード電圧)

4CH	40.00
8CH	0.01mC
7CH	27.01mC
6CH	-0.64mR
5CH	31.92A
4CH	-2.50mV
3CH	-81.73mV
2CH	0.12mR
1001CH	0.09mR
	20div/h

3CH	0.01mC
30.00	0.01mC
8CH	21.41mR
7CH	-0.64mR
6CH	0.02A
5CH	0.02A

W KOKUGAI

図5-1

1号機 カソード電圧・電流等 941214

945cm QUADT NO. 00265AH

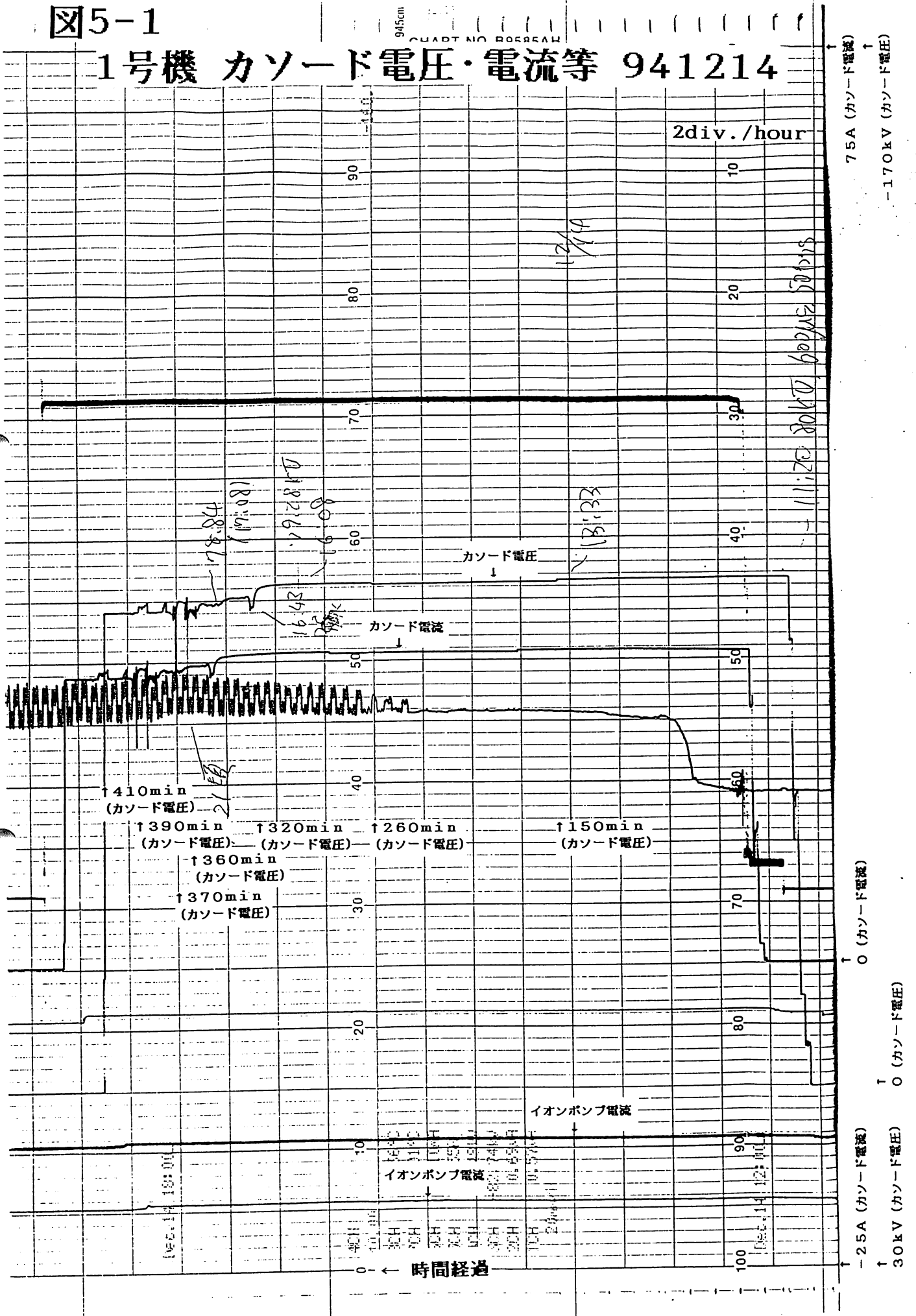
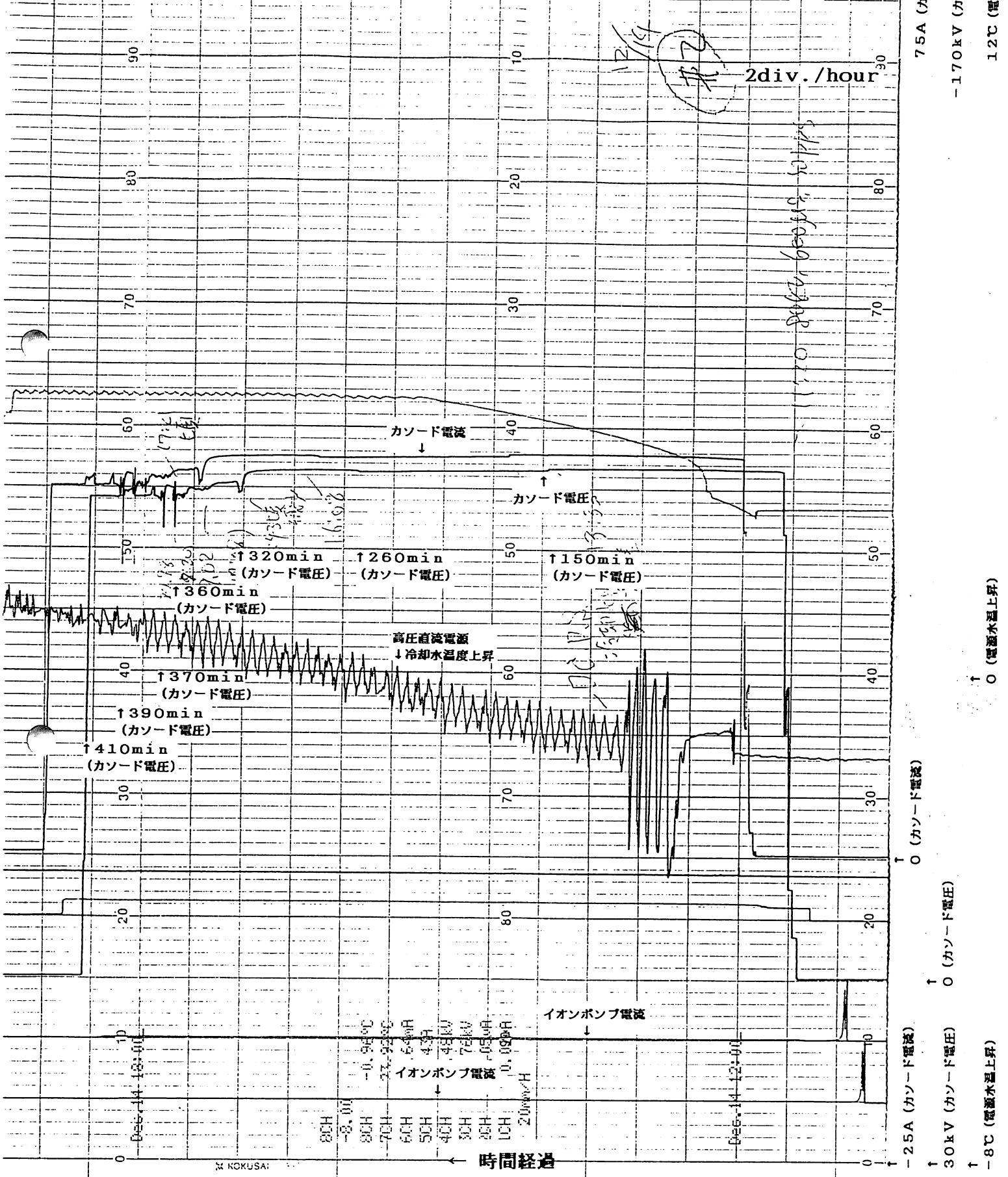


図5-2

2号機 カソード電圧・電流等 941214



KOKUSAI

AVR 盤制御回路基板内各種波形

941214

2div./hour

94-12-14
DATE

①
②
④
4V

③
10V

0V

② 電圧パターン信号
↓

① フィードバック電圧
↑

③ サイリスタ制御電圧
↑

③ 150min. ↑

③ 260min. ↑

③ 320min. ↑

③ 410min. ↑

③ 360min. ↑

③ 370min. ↑

③ 390min. ↑

13:32

16:07

時間経過 →

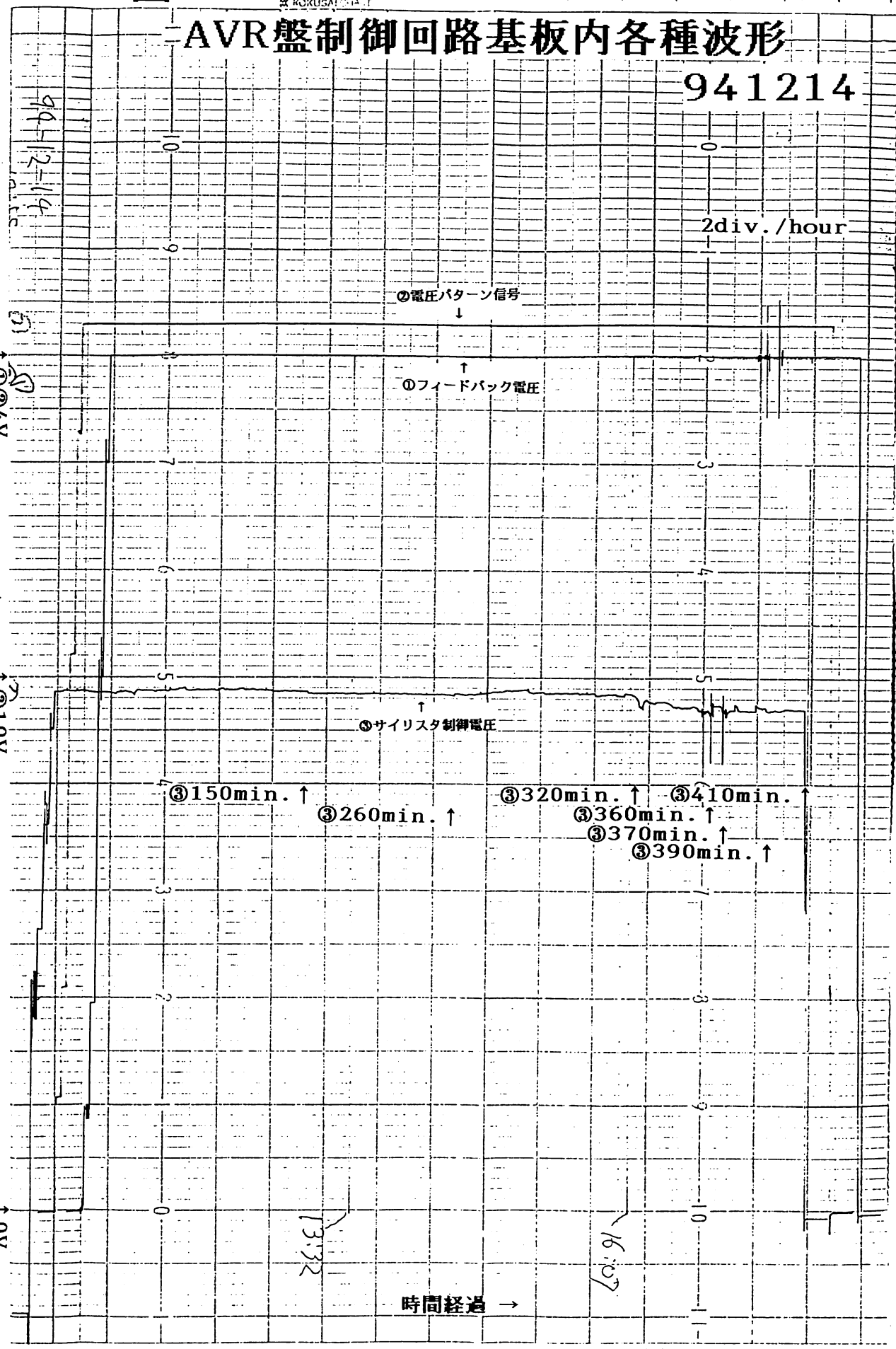
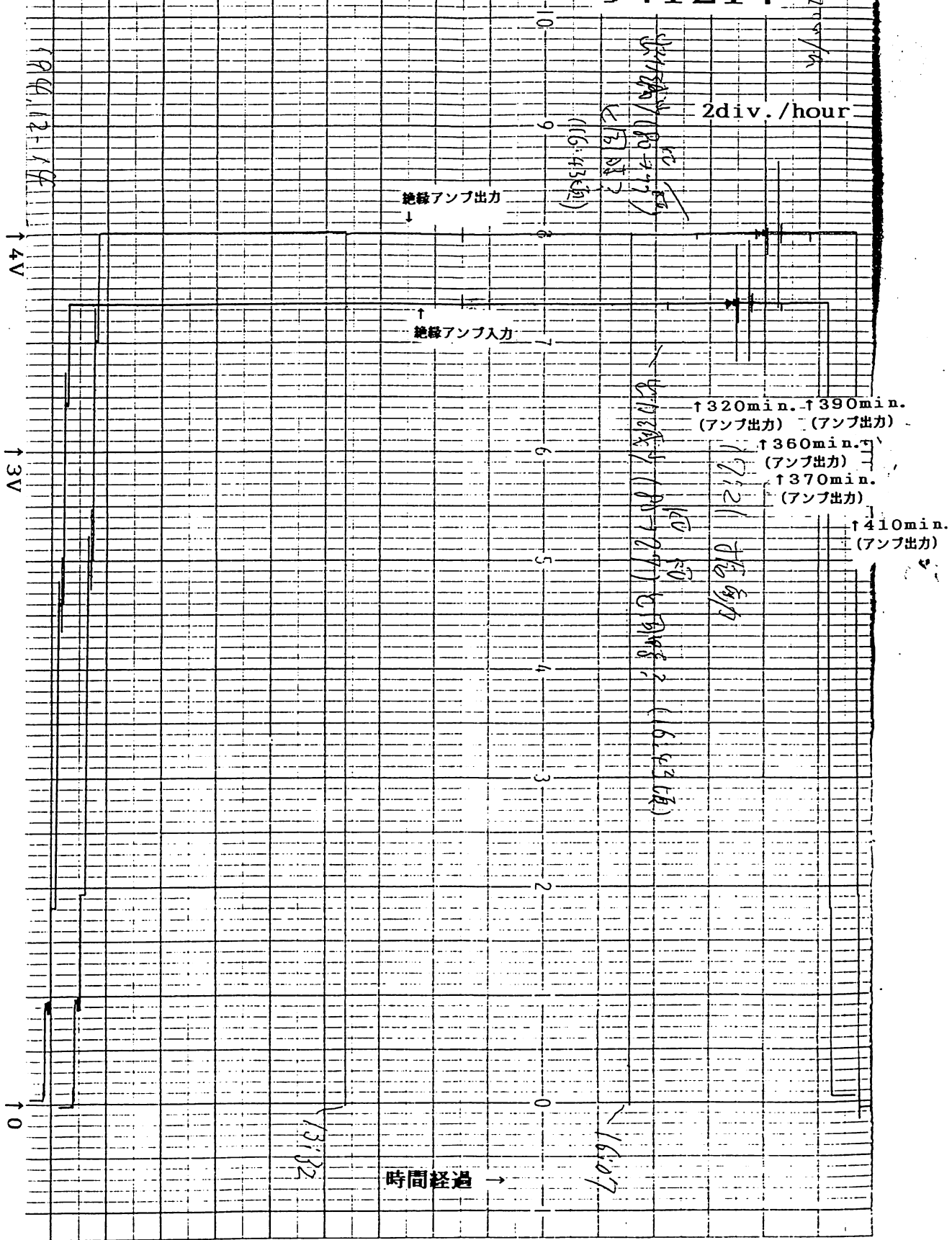
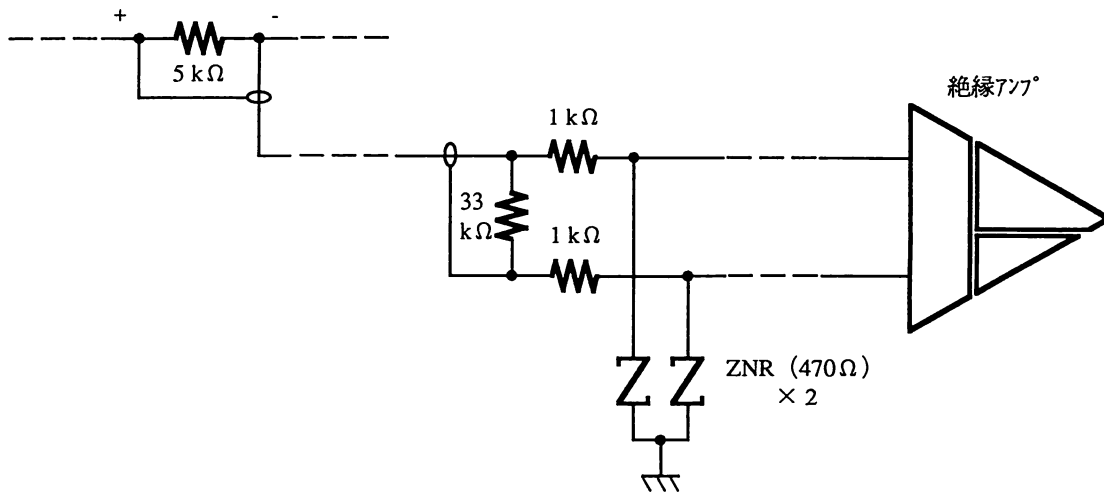


図5-4

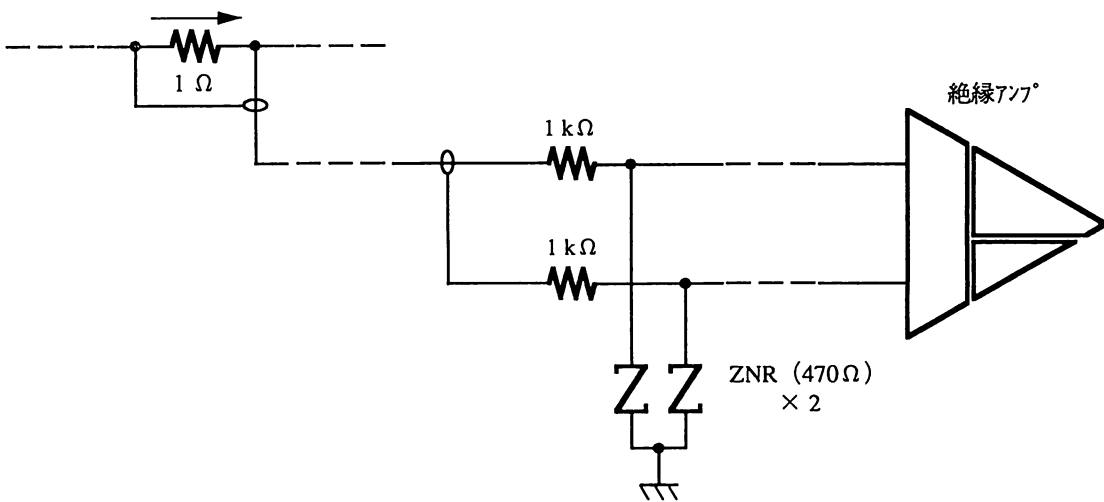
絶縁アンプ入力・出力

941214





(a) 電圧値検出



(b) 電流値検出

図6-1 高压直流電源モニタ用配線

図 7-1(1) 1号機カソード電圧・電流等 950124~5 (1)

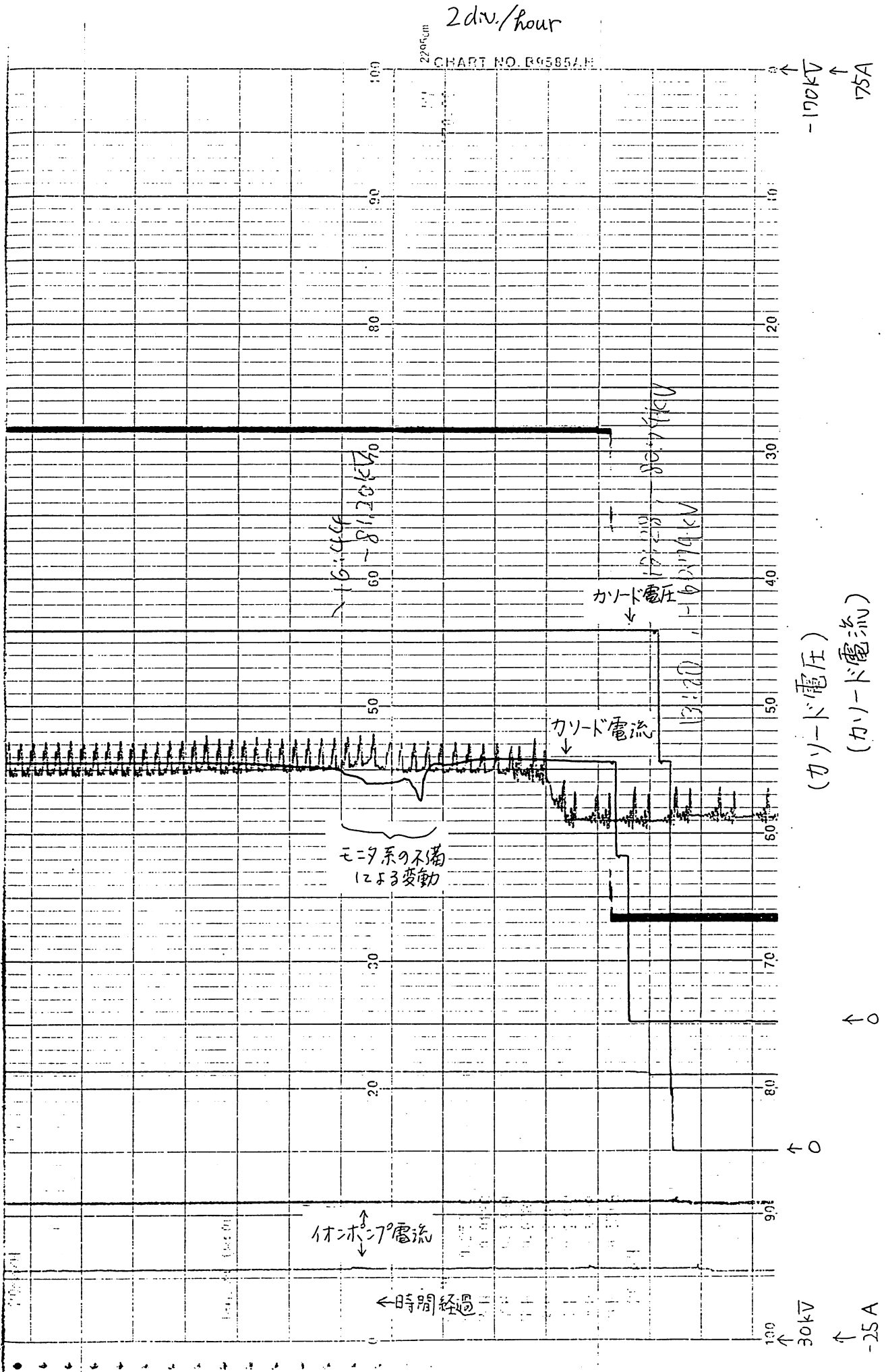


図7-1(2) 1号機カソード電圧・電流等

950/24~5(2)

2 div./hour

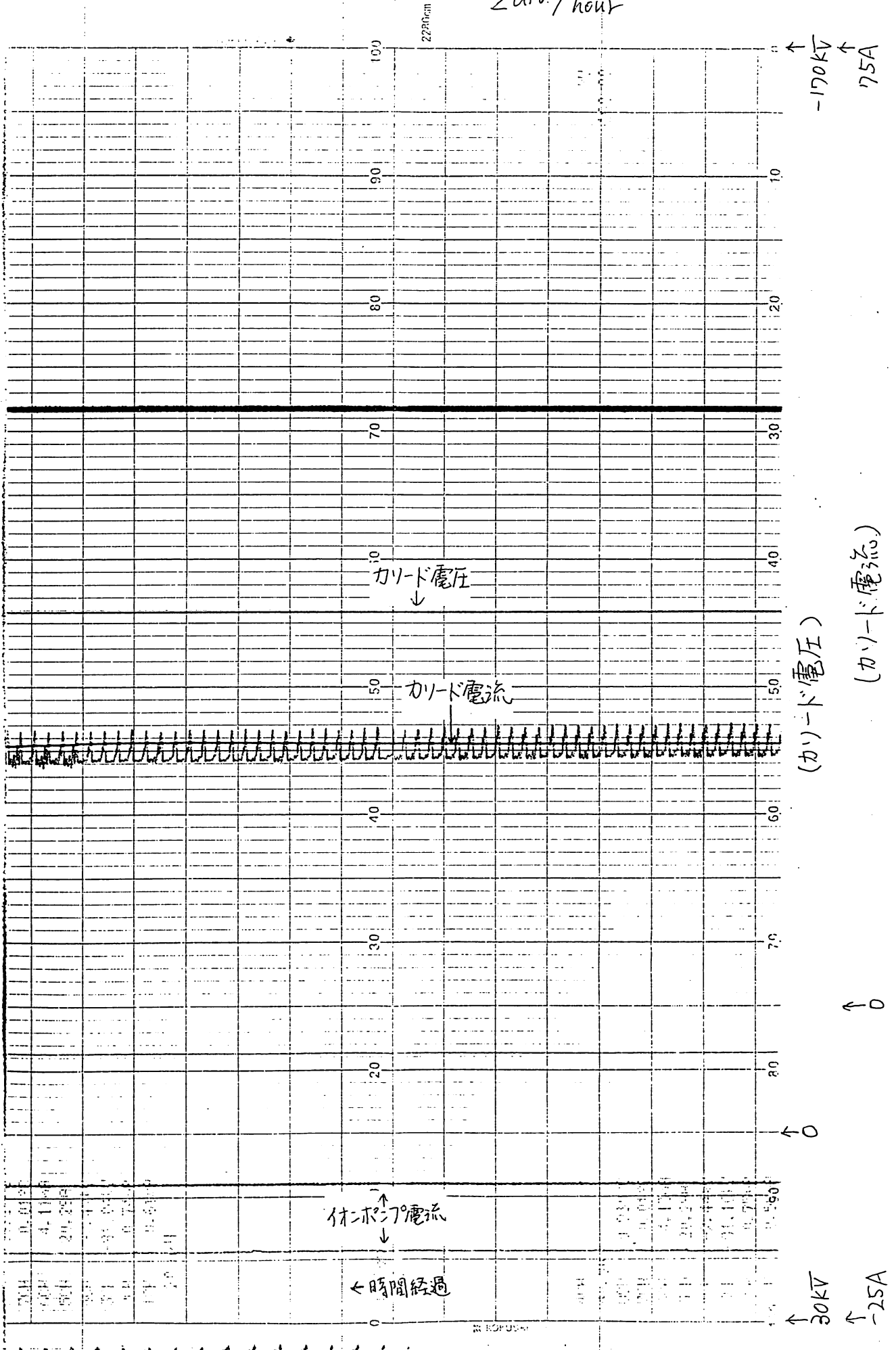


図7-2 2号機カソード電圧, 高圧直流電源冷却水温上昇等
950124~5

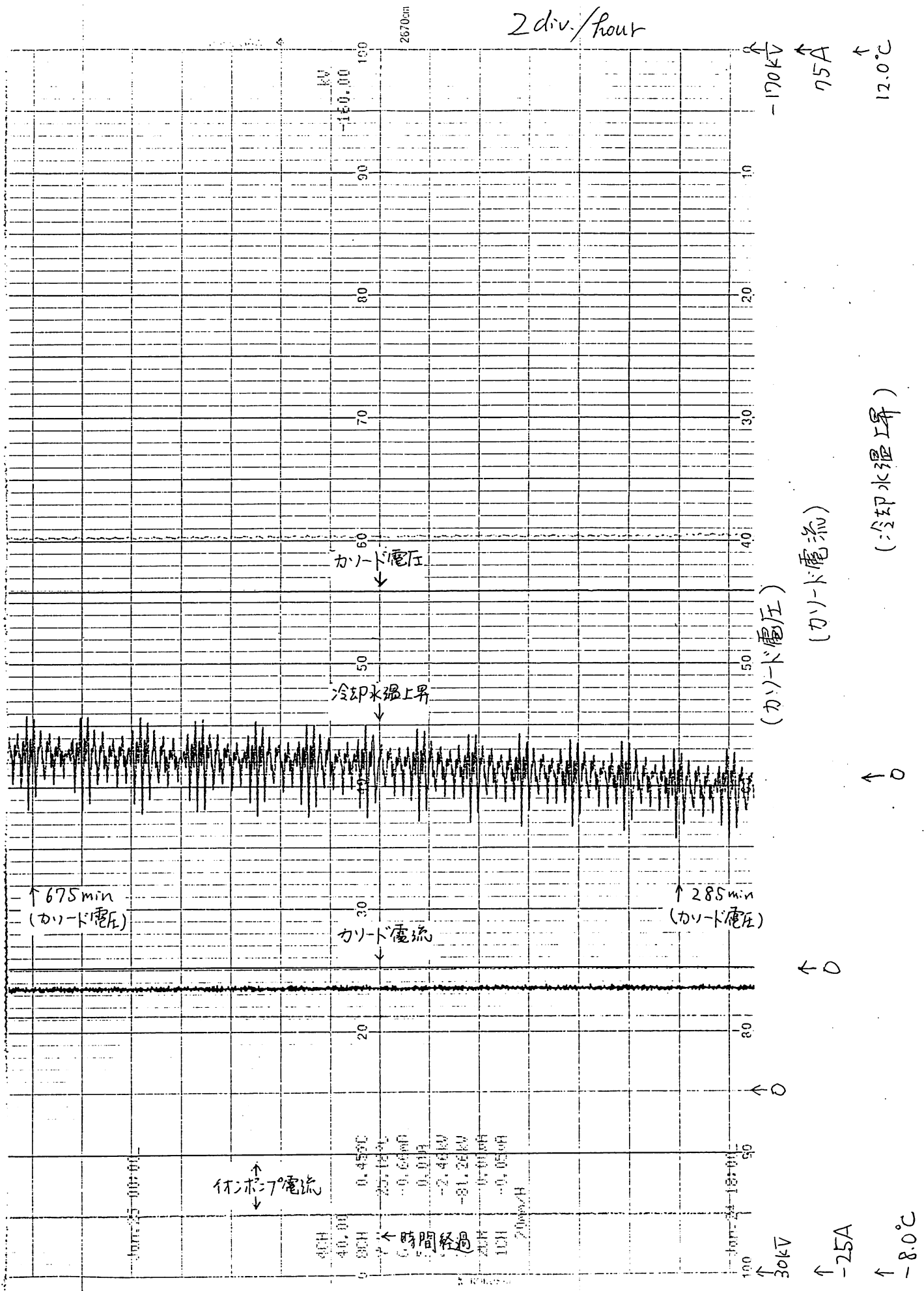
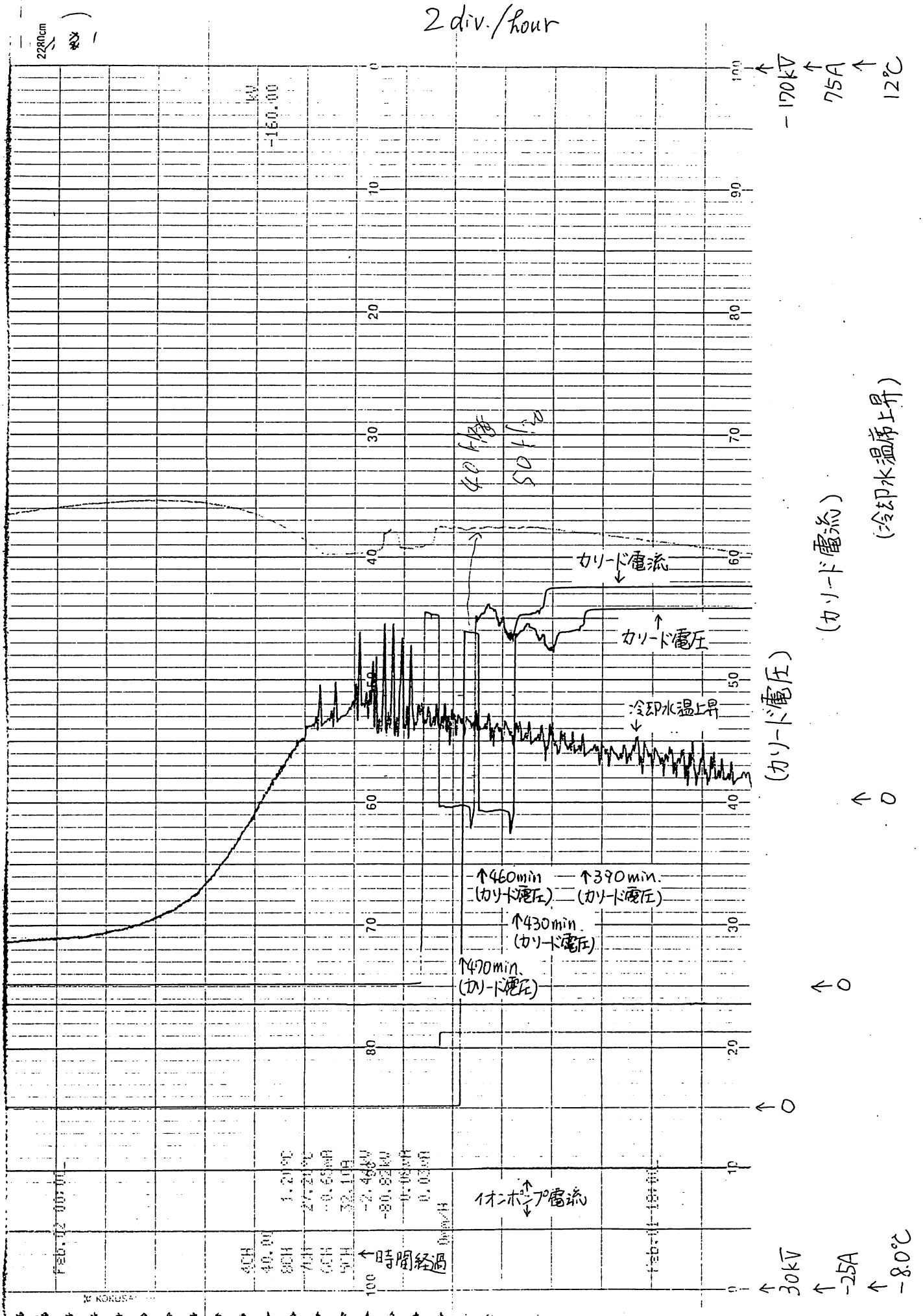


図 8-1 (2) 2号機 カソード電圧・電流等 950201 (2)



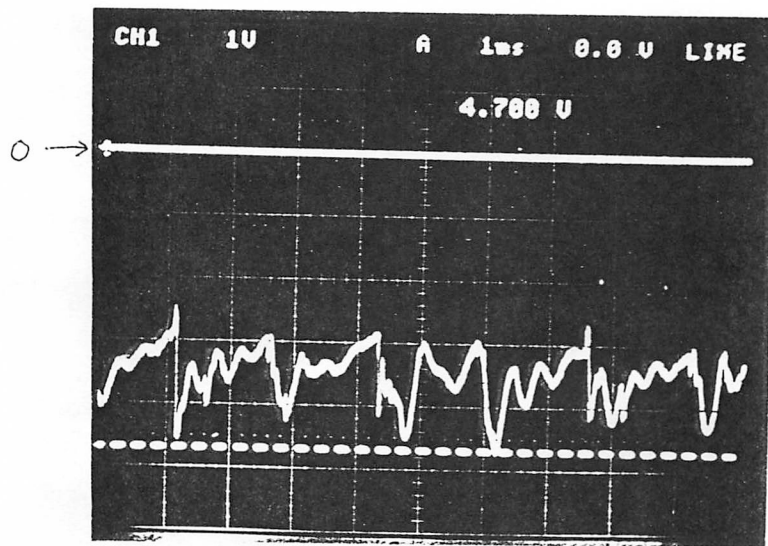


図8-2 マスタ-スレーブ回路の
入力波形

図 8-3 (1) 2号機カソード電圧・電流等 950202~3 (1)

2 div./hour

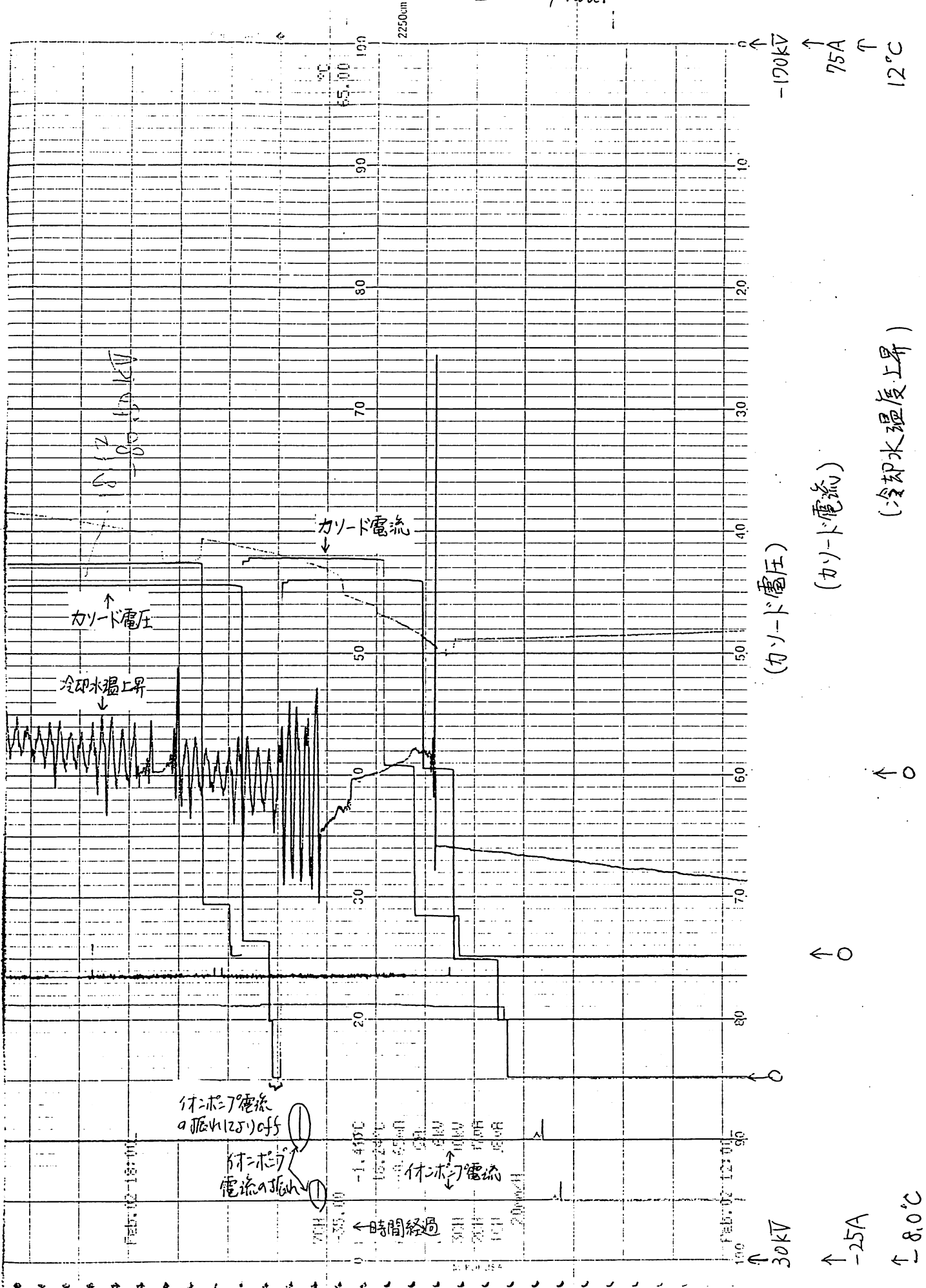


図8-3(3) 2号機カソード電圧・電流等 950202~3 (3)

2div/10μs

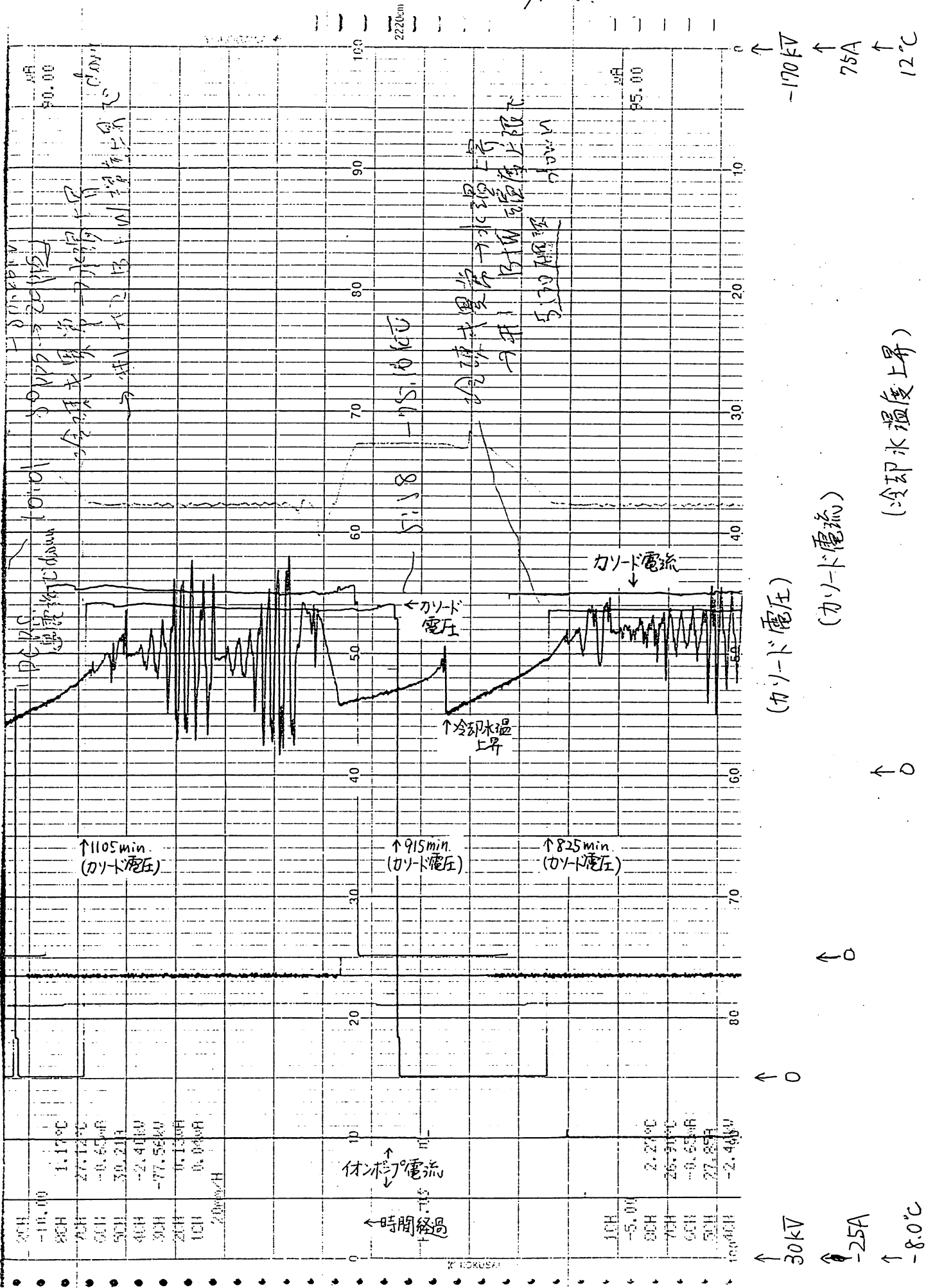


図8-3(4) 2号機カソード電圧・電流等 950202~3(4)

2 div./hour

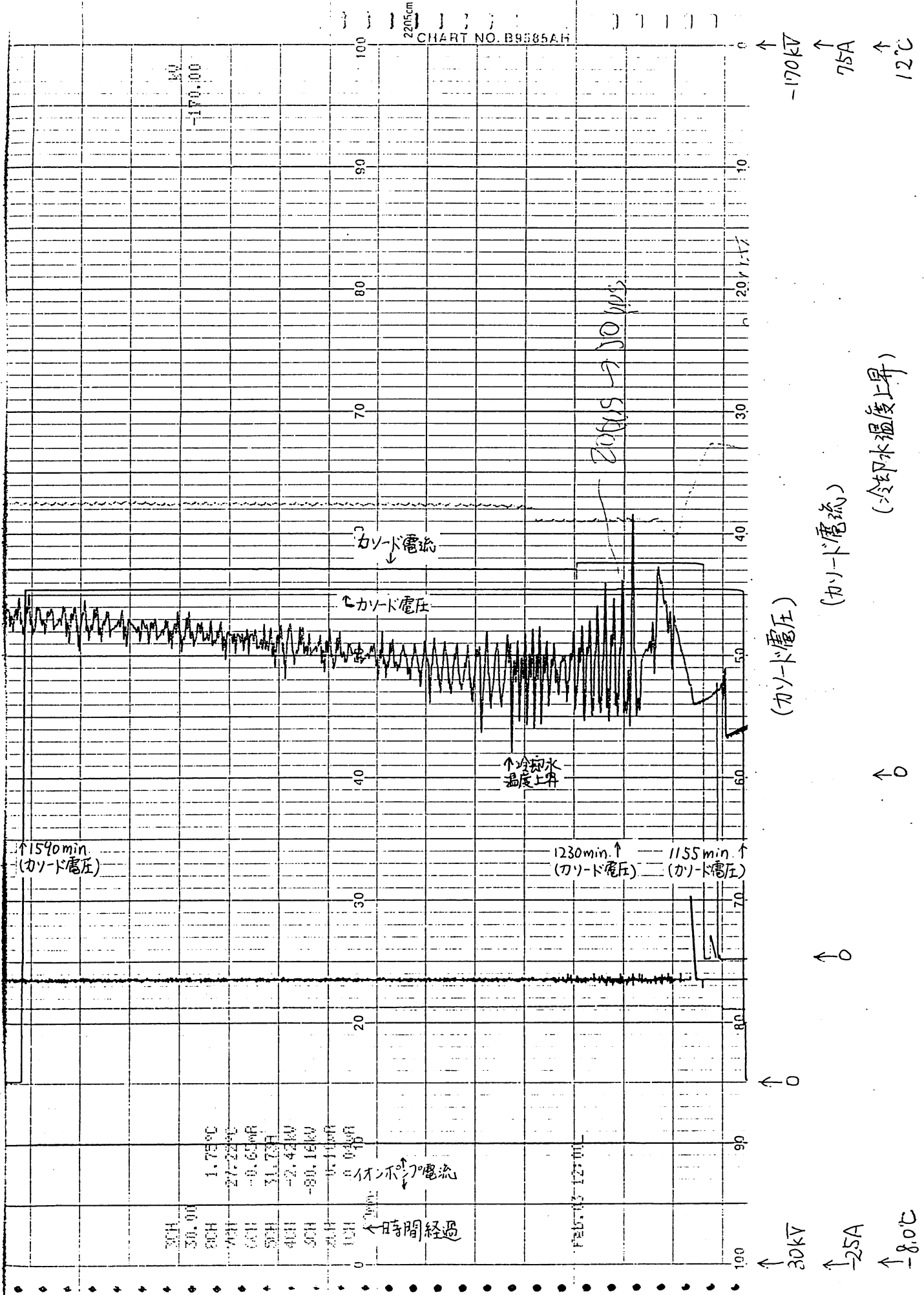


図8-3(5) 2号機カソード電圧・電流等 950202~03 (5)

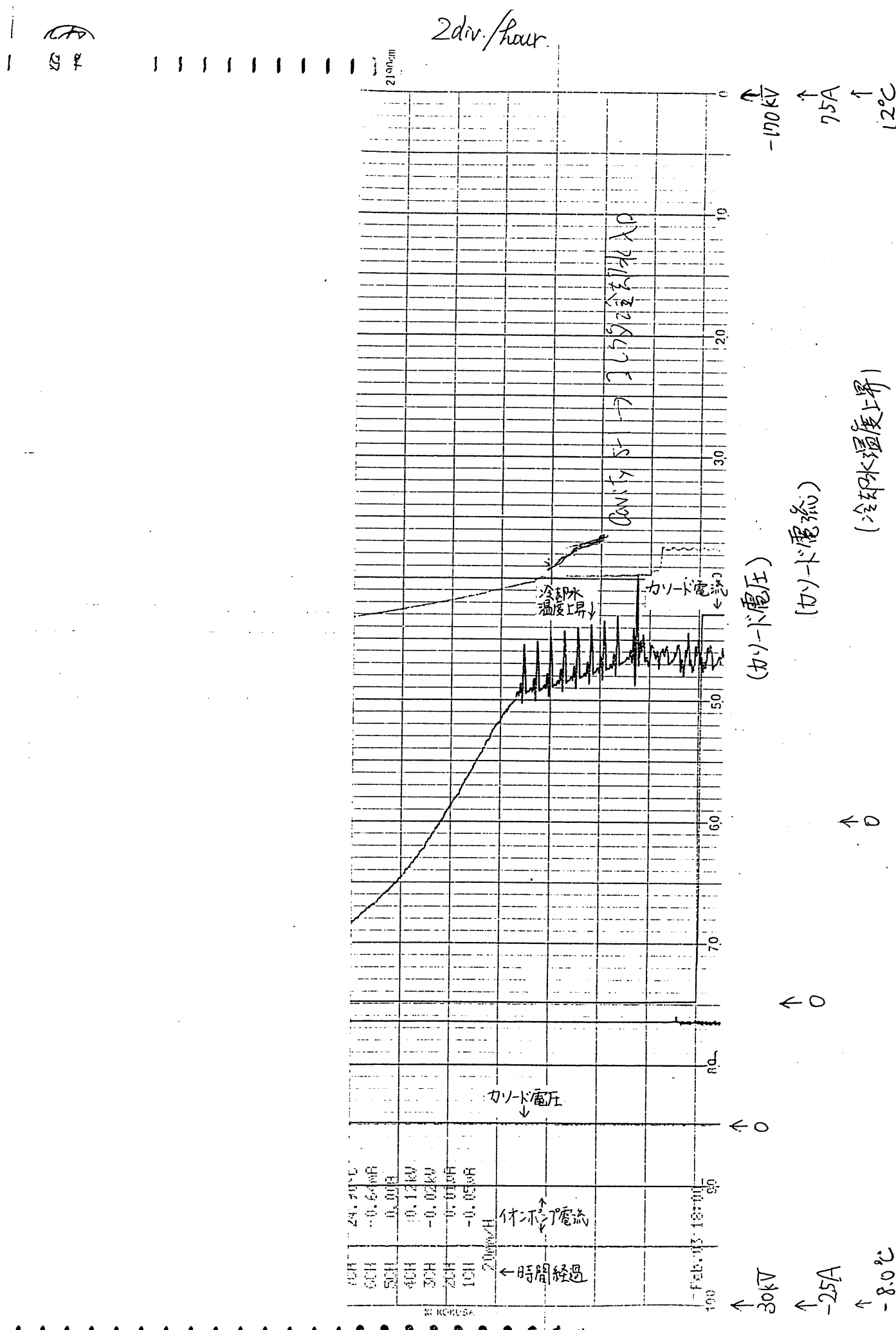
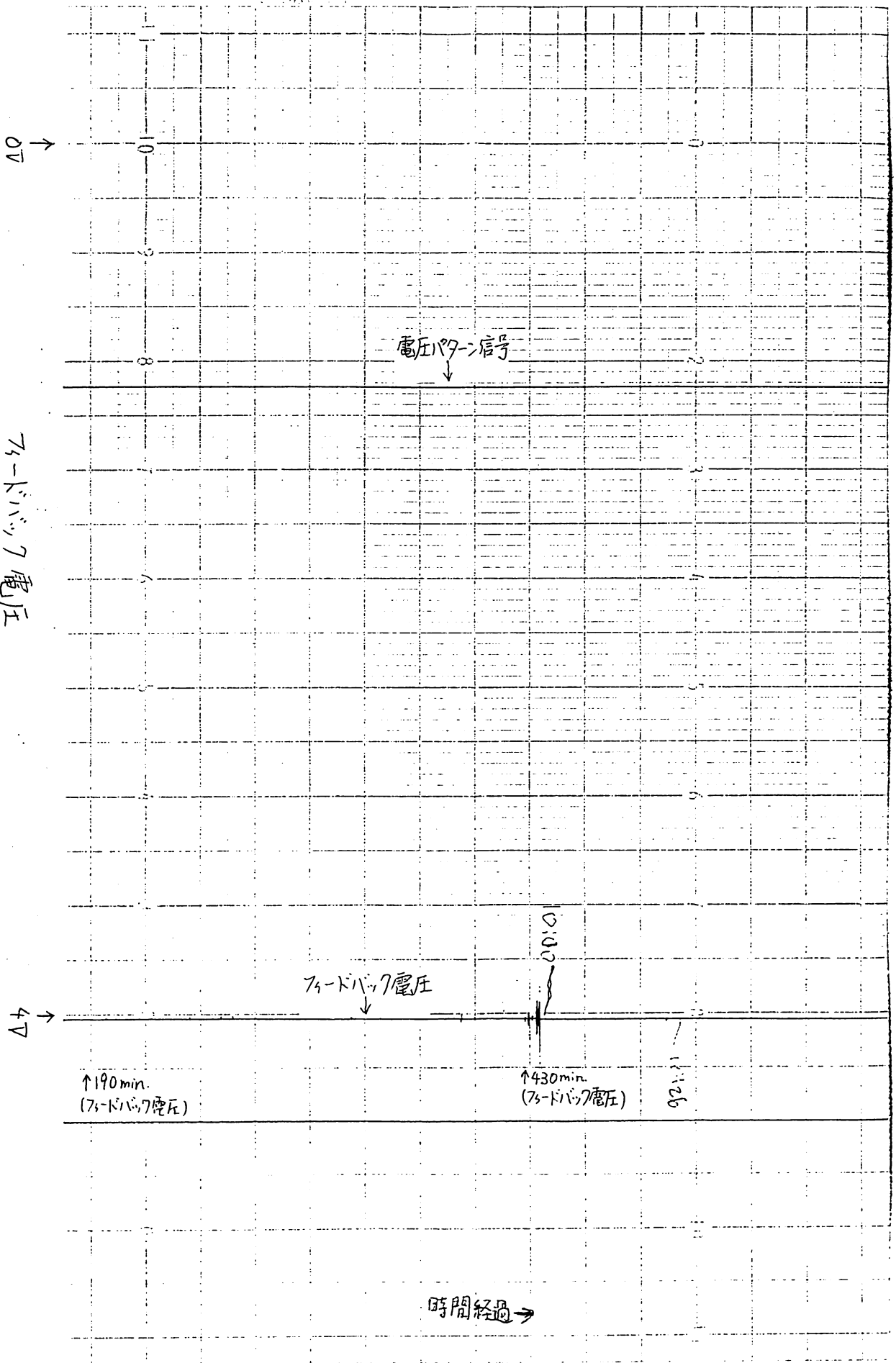


図 8-4 (1) AVR 盤制御回路基板内各種波形 950202~3 (1)

2 div./hour.

0.30

0.20



4V

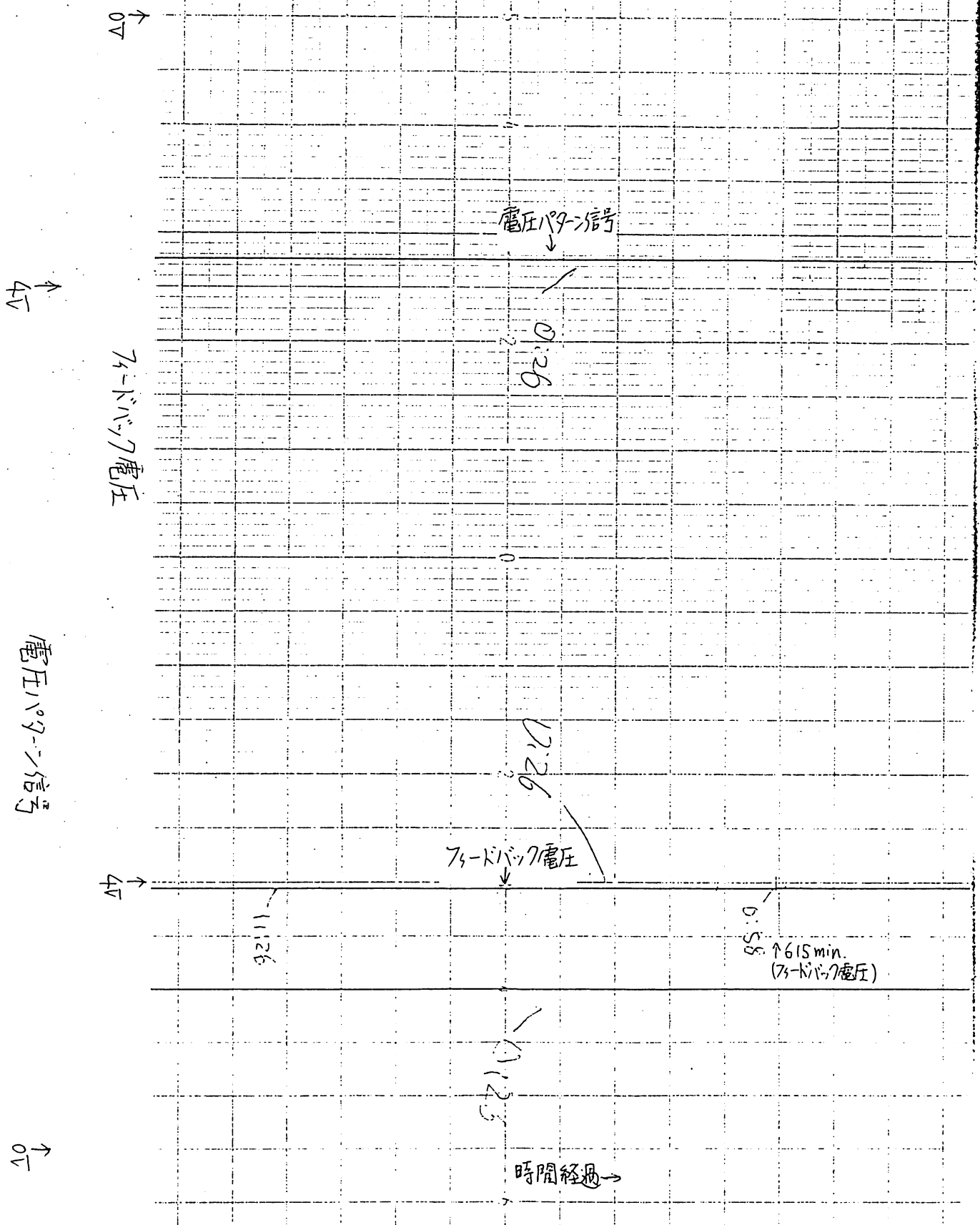
電圧パルシ-ン信号

0V

図8-4(2) AVR盤制御回路基板内各種波形 950202~3(2)

810

2div./hour



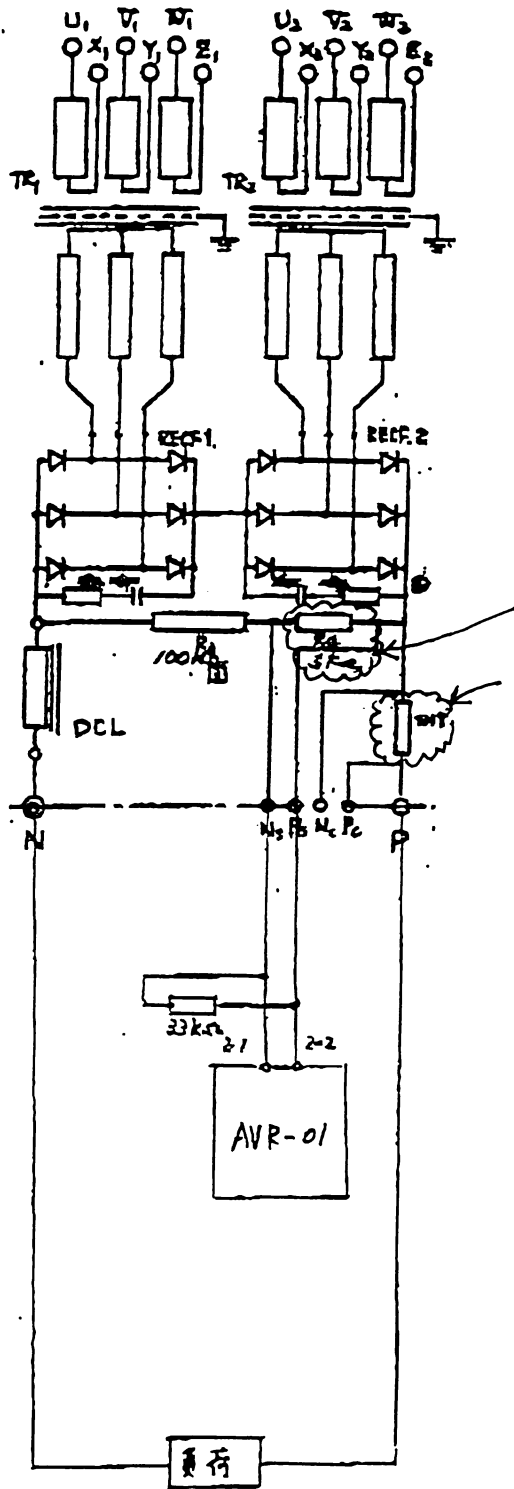
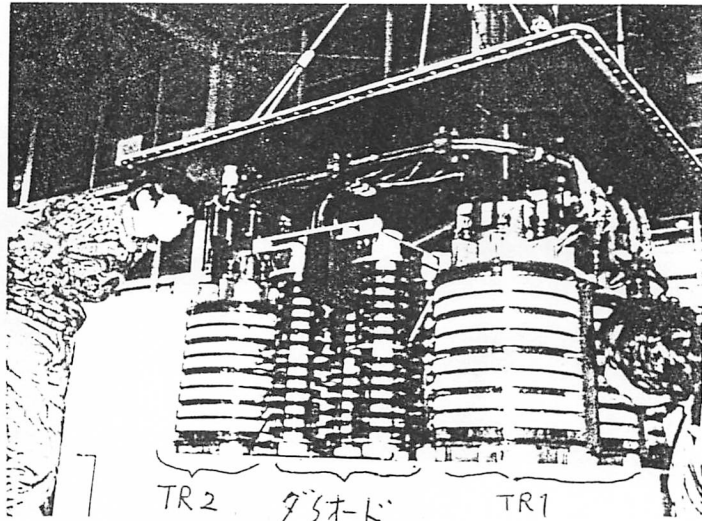


図 8-5

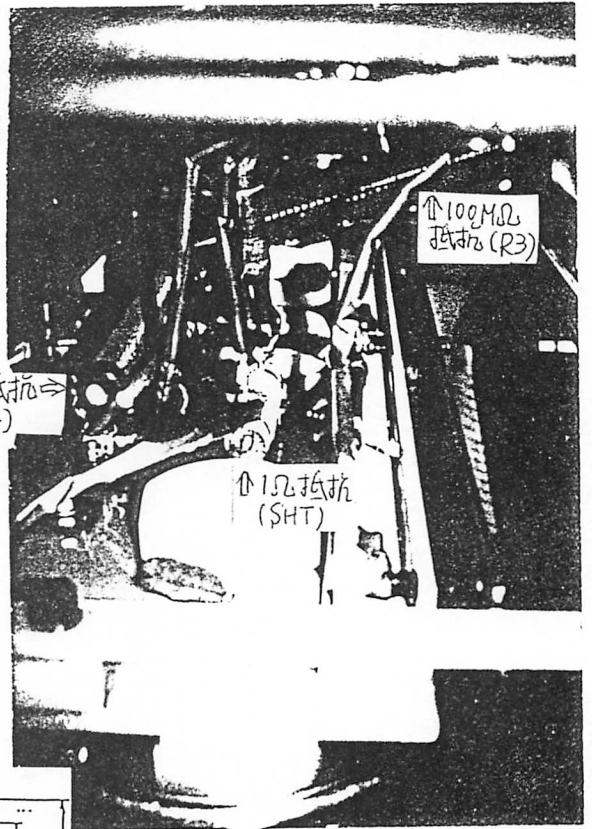
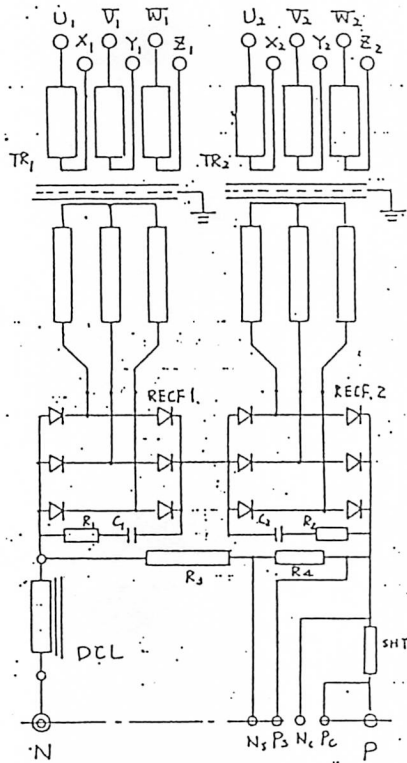
高圧直流電源まわりの回路図



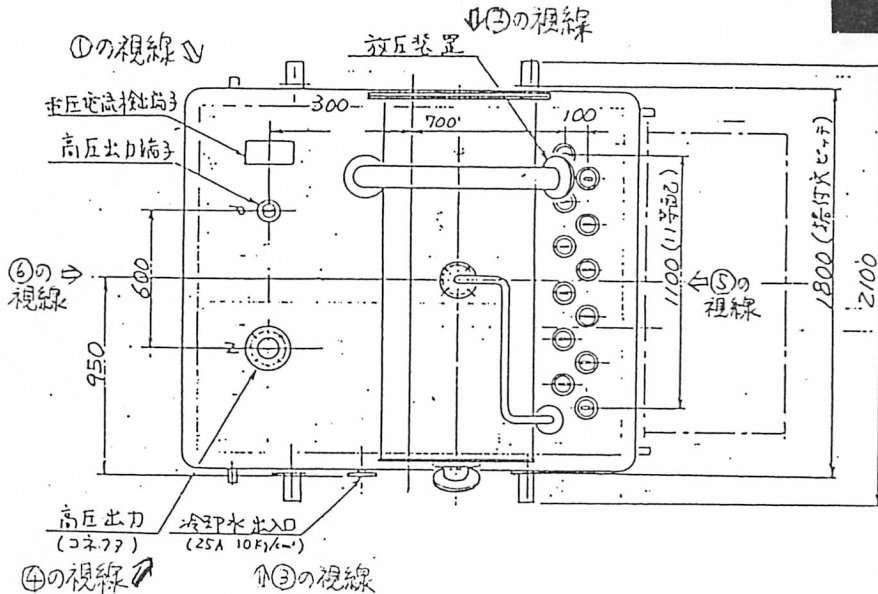
TR2 グラウド (RECT1,2) TR1

写真①

タ-7から引き上げた直後



結線図



写真②

図8-6(1)

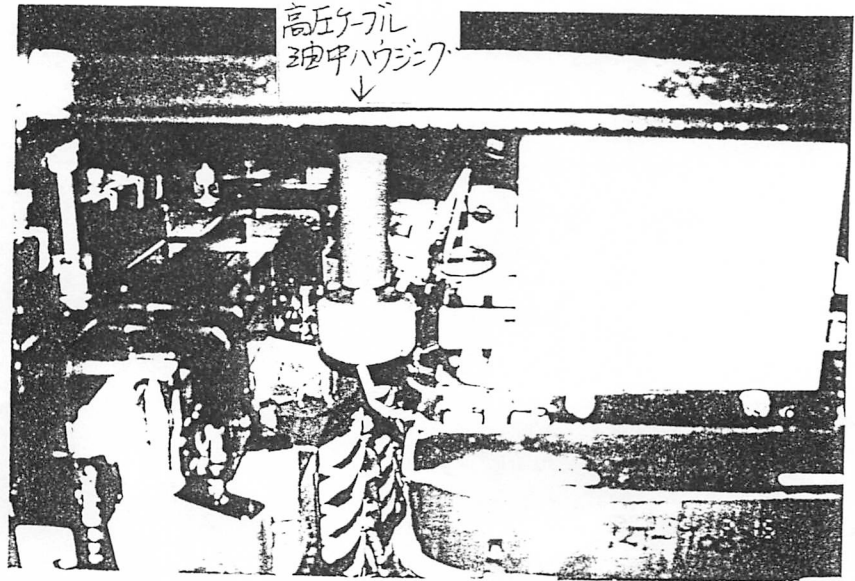


写真 ③

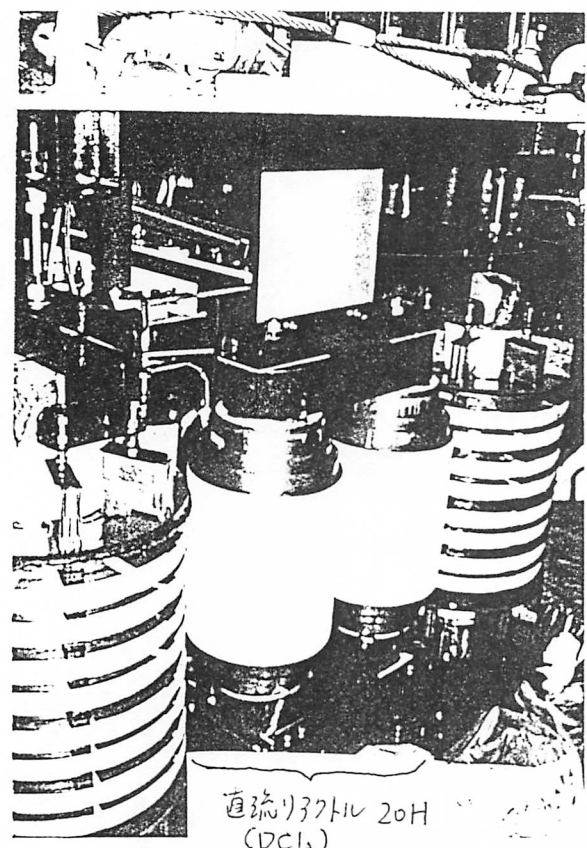
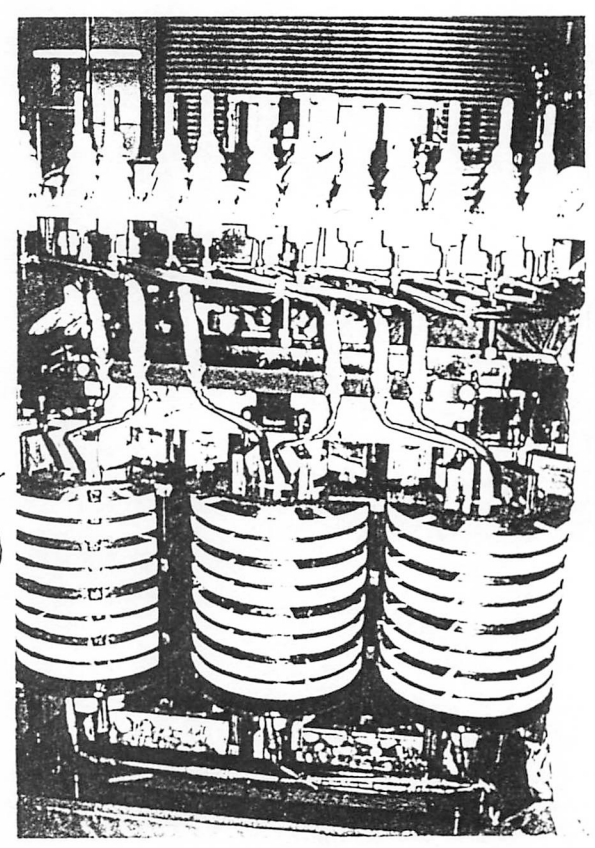
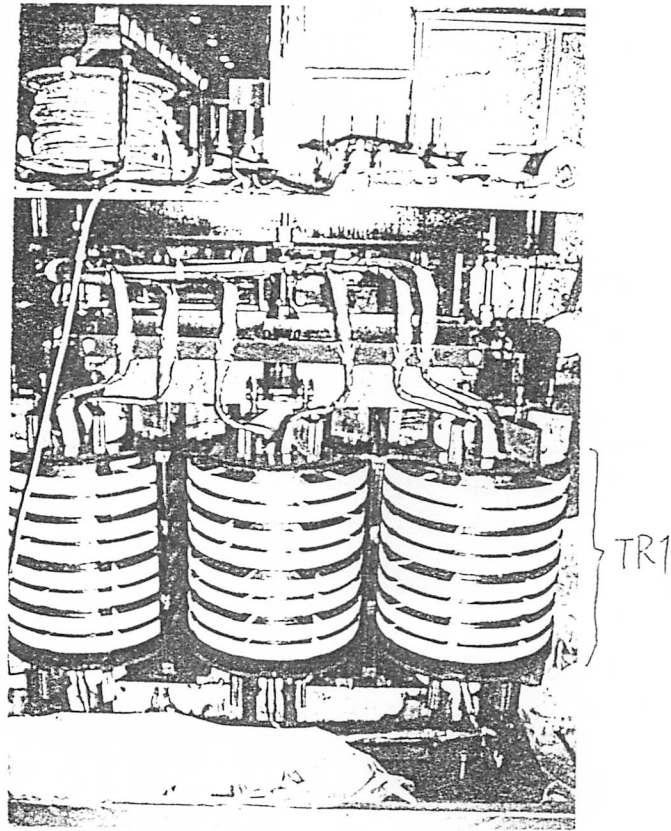


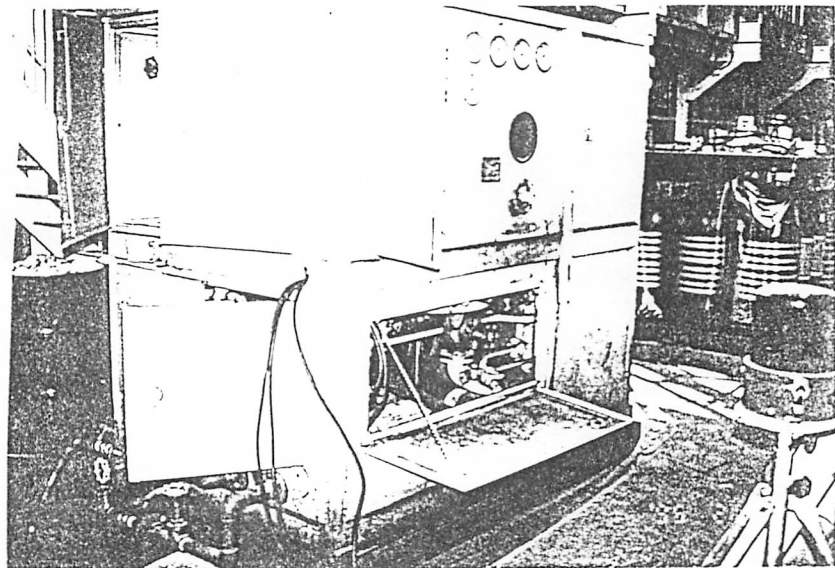
写真 ④



TR2 写真 ⑤



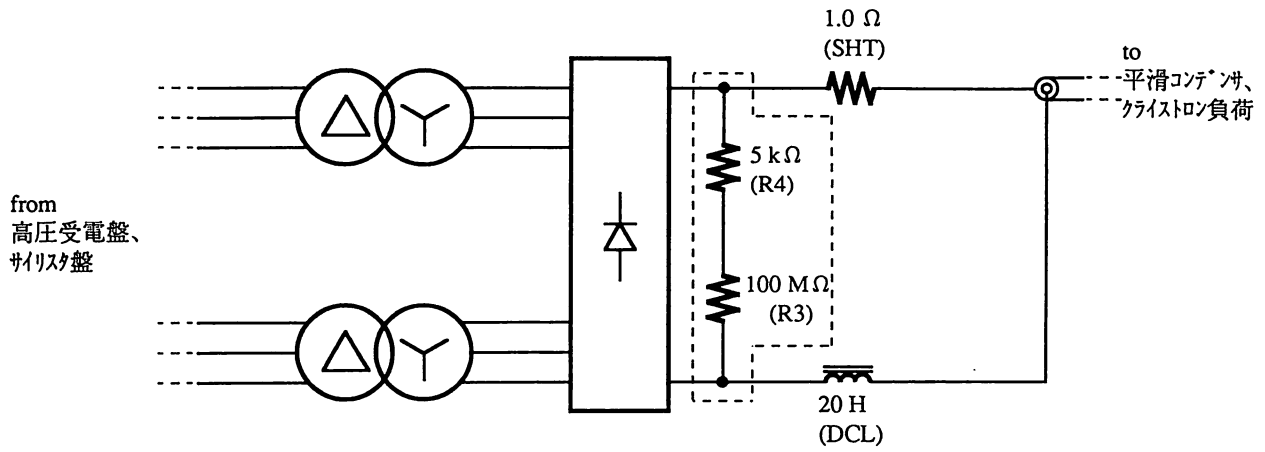
写真⑥



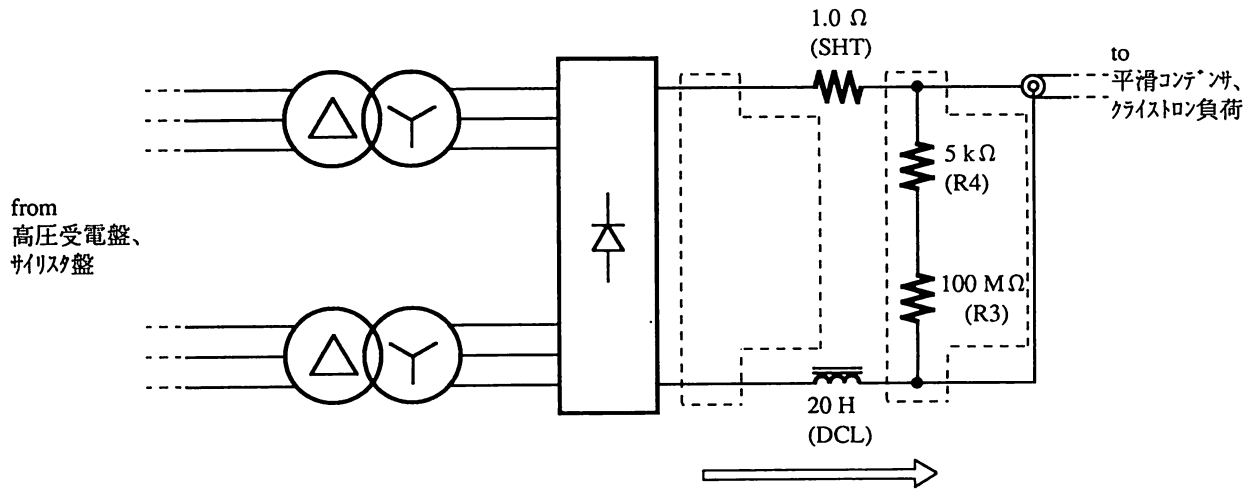
写真⑦

真空淨油機 (2200^{mm} × 1400^{mm} × 2100^{mm})

図8-6(3)



(a)変更前



(b)変更後

図8-7 高压直流電源内の配線変更

図8-8(1) 2号機カソード電圧・電流等 950218(1)

2 div./Hour.

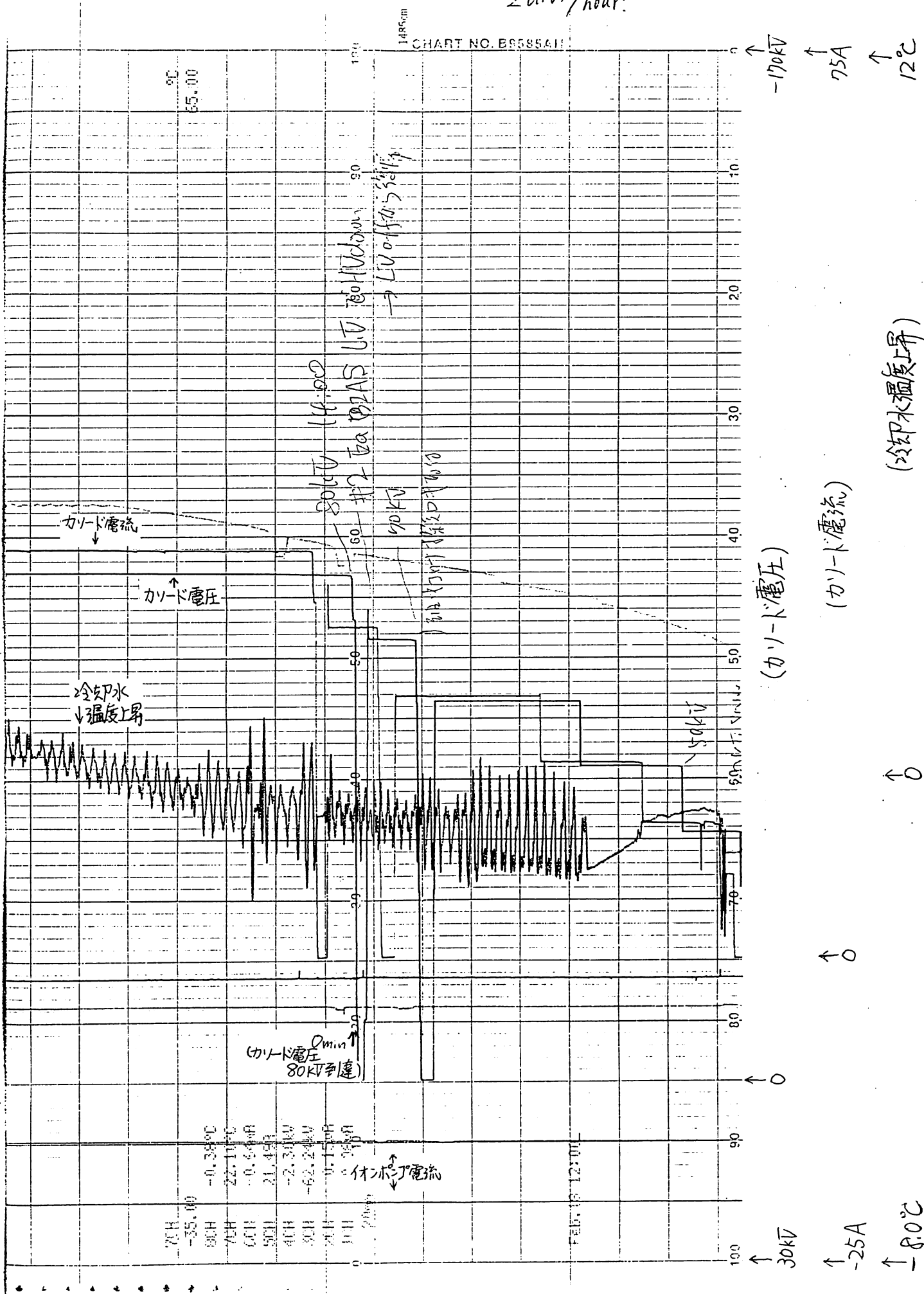


図8-8(2) 2号機カソード電圧・電流等 950218(2)

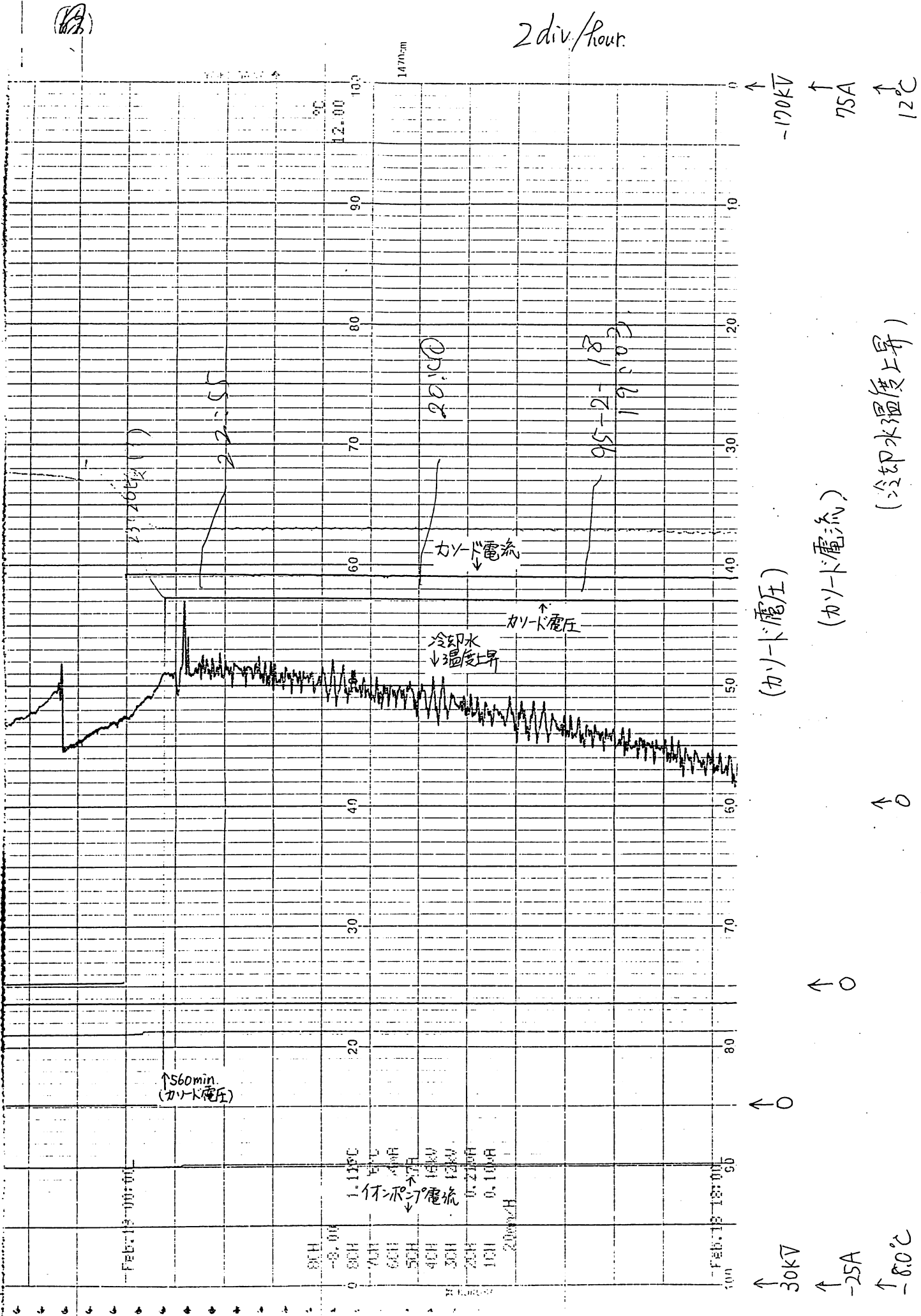


図8-9(1) 2号機カソード電圧・電流等 950219 (1)

2 div./hour

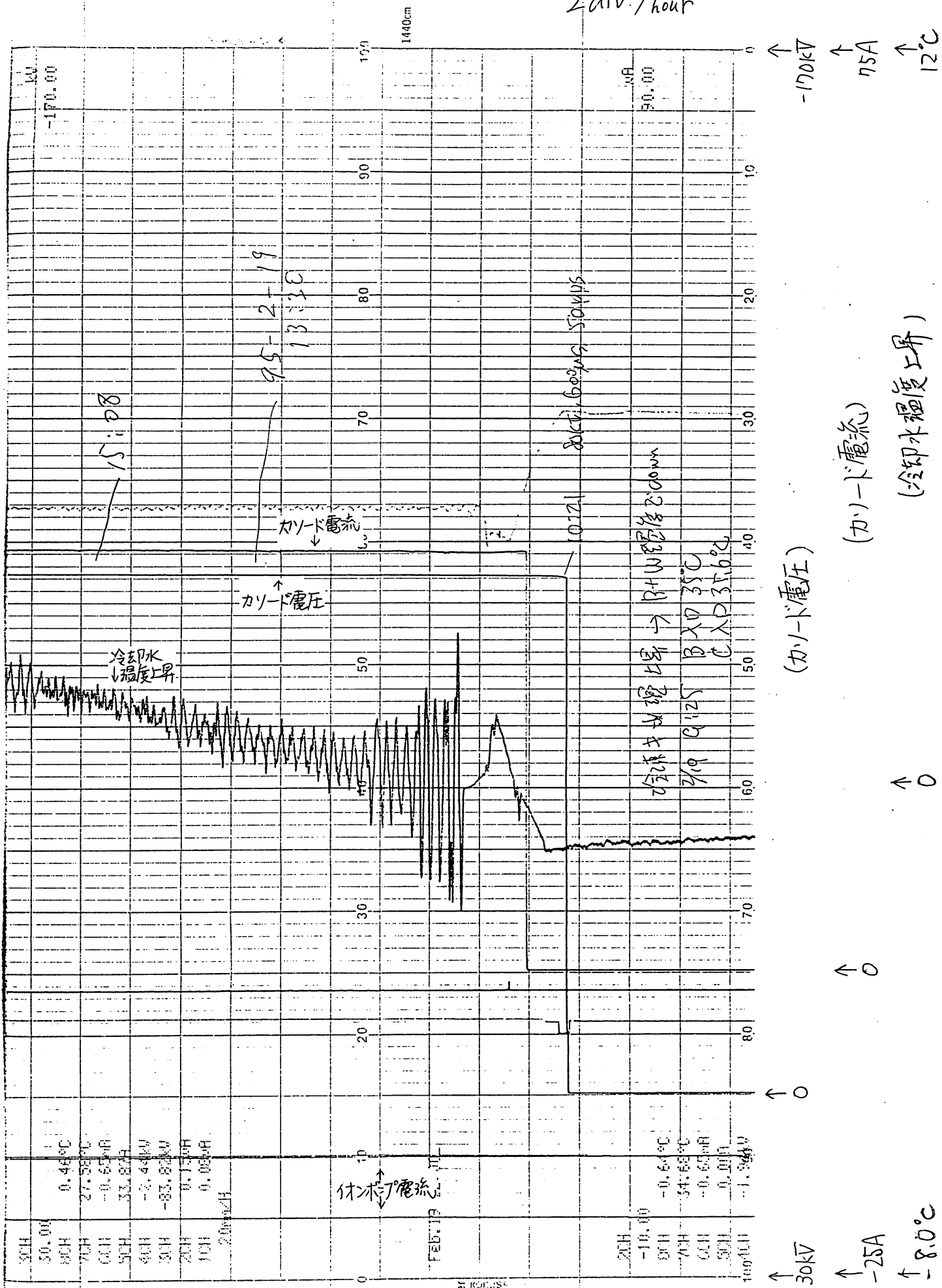


図8-9(2) 2号機カソード電圧・電流等

950219(2)

2 div./hour

1425cm CHART NO. B95855AH

↑ 30kV
↑ -25A
↑ -80°C

↑ 0
↑ 0
↑ 0

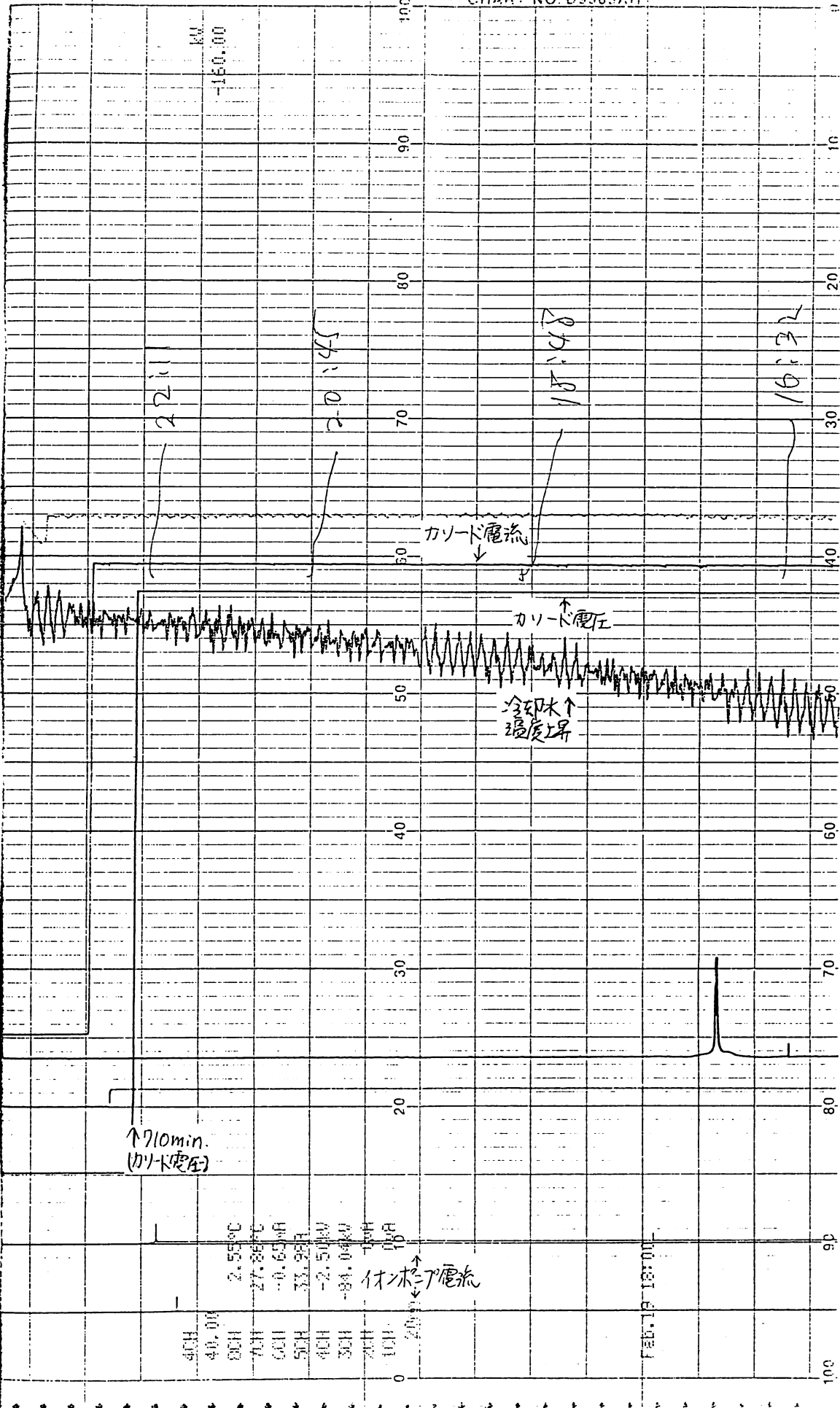
↑ 0
↑ 0
↑ 0

↑ 0
↑ 0
↑ 0

↑ 0
↑ 0
↑ 0

↑ 0
↑ 0
↑ 0

↑ 0
↑ 0
↑ 0



↑ -170kV

↑ 75A

↑ 12°C

(カソード電圧)

(カソード電流)

(冷却水温度上昇)

冷却水↑
温度上昇

↑ 710min.
(カソード電圧)

40H 40.00
50H 2.55°C
70H 27.86°C
80H -0.65mA
90H 33.28V
100H -2.50kV
110H -84.04kV
120H 0.00mA
130H 0.00mA
140H 20.00V
150H 0.00V
冷却水電流

FEB 19 18:00