

Co⁶⁰ による放射線検査

泉 八郎* 鷺山重也** 戸島日出雄***

Inspection by Radiography Co⁶⁰

By Hachirō Izumi, Shigeya Sagiya and Hideo Toshima
Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

The use of radioisotopes in industrial applications is swiftly acquiring popularity in this country. Hitachi Works, Hitachi, Ltd., has launched recently into radiographic inspection of castings by means of Co⁶⁰ of 4 curies. The advantage of this novel method of inspection lies in low maintenance and installation cost, availability for castings with irregular thickness, and outstanding permeability and all of these merits are savoured by concerned engineers at Hitachi Works. On the other hand, the inspection by this means needs much more time than other practices and meticulous care should be exercised in handling and storing this strong radioactive material, which constitutes some drawbacks of this method.

Co⁶⁰ owned by Hitachi Works is of considerably large volume, hence, in view of safety, the testing shop is separated some distance from the other factories and castings to be inspected are transported to the shop on trucks. Also, when not in use, the Co⁶⁰ is put in a lead container and kept in the concrete shed.

Furthermore, films for γ -ray radiography have been solely supplied from abroad, and that in a very limited quantity. Fortunately, recent trial manufacture of domestic products has ended in a fair success. At Hitachi, these domestic films were ascertained of their excellent quality and taken into actual use with a selfmade exposure table as a guide. Examples of them are shown in the article as a reference.

〔I〕 緒 言

放射性物質たとえばラジウムなどを利用して、透過写真撮影を行い、材料の内部欠陥の有無を調べることは、古くから知られていたが、放射性物質が高価であつたり、きわめて微量しかえられなかつたため、ほとんど実用にならなかつた。

第二次世界大戦後、原子力工業の発展に伴い、強力な原子炉が建設されるようになったので、放射性物質を安価に多量に供給できるようになった。したがつて放射性物質を利用する透過写真撮影法による材料内部の欠陥探傷は、大いに盛んになつてきた。放射性同位元素コバルト 60 (Co⁶⁰) は、半減期の長いこと、その放射線が強力であることによつて、この方面に最も多く使用されている。

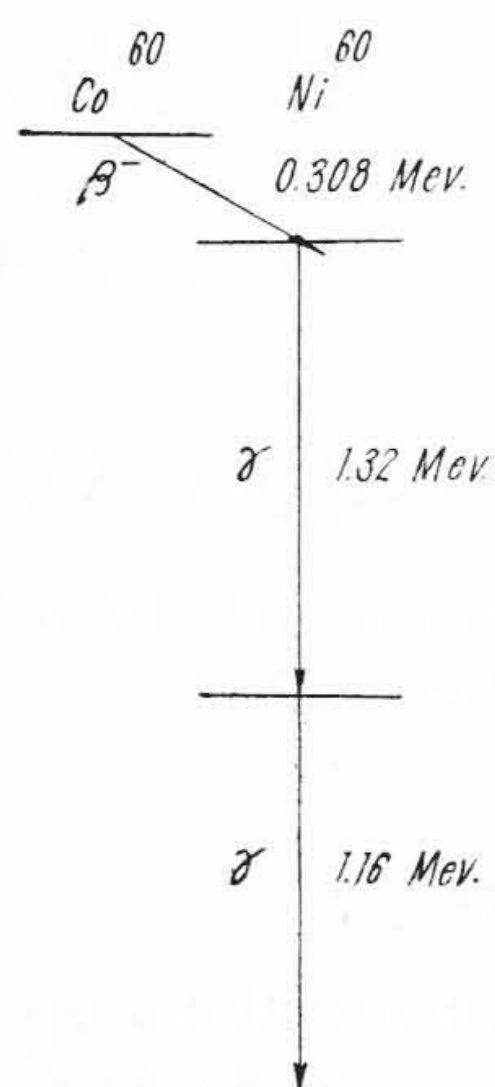
日立製作所日立工場では4キュリー†の Co⁶⁰ を使用して、蒸気タービンや水車の主要鋳鋼品などについて、放射線による内部欠陥の検査を開始した。我国で工業方面に使用される Co⁶⁰ は、普通 300~500 ミリキュリーのものが普通であり、このように大容量の Co⁶⁰ を使用している例は、ほかにはないようである。以下日立工場における Co⁶⁰ による放射線検査の概要を報告する。

〔II〕 Co⁶⁰ について⁽¹⁾⁽²⁾

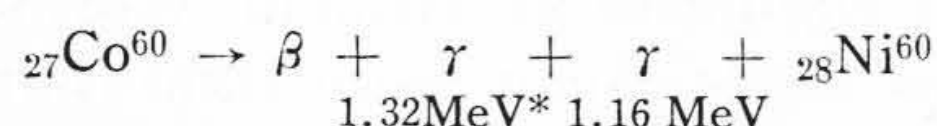
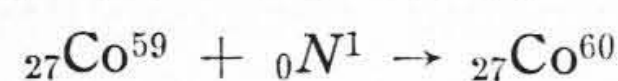
放射性同位元素 Co⁶⁰ は、普通の化学的に純粋なコバルトを原子炉の内部で中性子にさらすことによつて作られる。不安定な Co⁶⁰ は β 線と2種類の γ 線を出して崩壊し、安定な Ni⁶⁰ になる。その崩壊機構は次式およ

† キュリー (Curies) は放射性物質の量の単位である。1キュリー (1C) は毎秒 3.70×10^{10} の原子崩壊を行う放射性原子核種の量をいう。キュリーの1,000分の1をミリキュリー (1mC) という。

* ** *** 日立製作所日立工場

第1図 Co⁶⁰ の崩壊機構Fig.1. Decay Scheme of Co⁶⁰

び第1図に示すとおりである。



β線は放射線検査には不用である。β線は僅か $1/10$ mm程度の鋼で吸収される。Co⁶⁰は不銹鋼製カプセルに入れてあるから、β線はカプセルにさえぎられて、外へ出ない。

放射線検査はCo⁶⁰の2種類のγ線を利用する。γ線とX線とは、その発生する機構が異なるが、いずれも電磁波である。Co⁶⁰のγ線は、2,000,000VのX線発生装置の出すX線の平均エネルギーと等しいエネルギーを有し、その透過力も等しい。Co⁶⁰のγ線がある物質に入射してそれを通過する際、γ線の強さをもとの強さの半分に減らす物質の厚みは、つぎのとおりである。

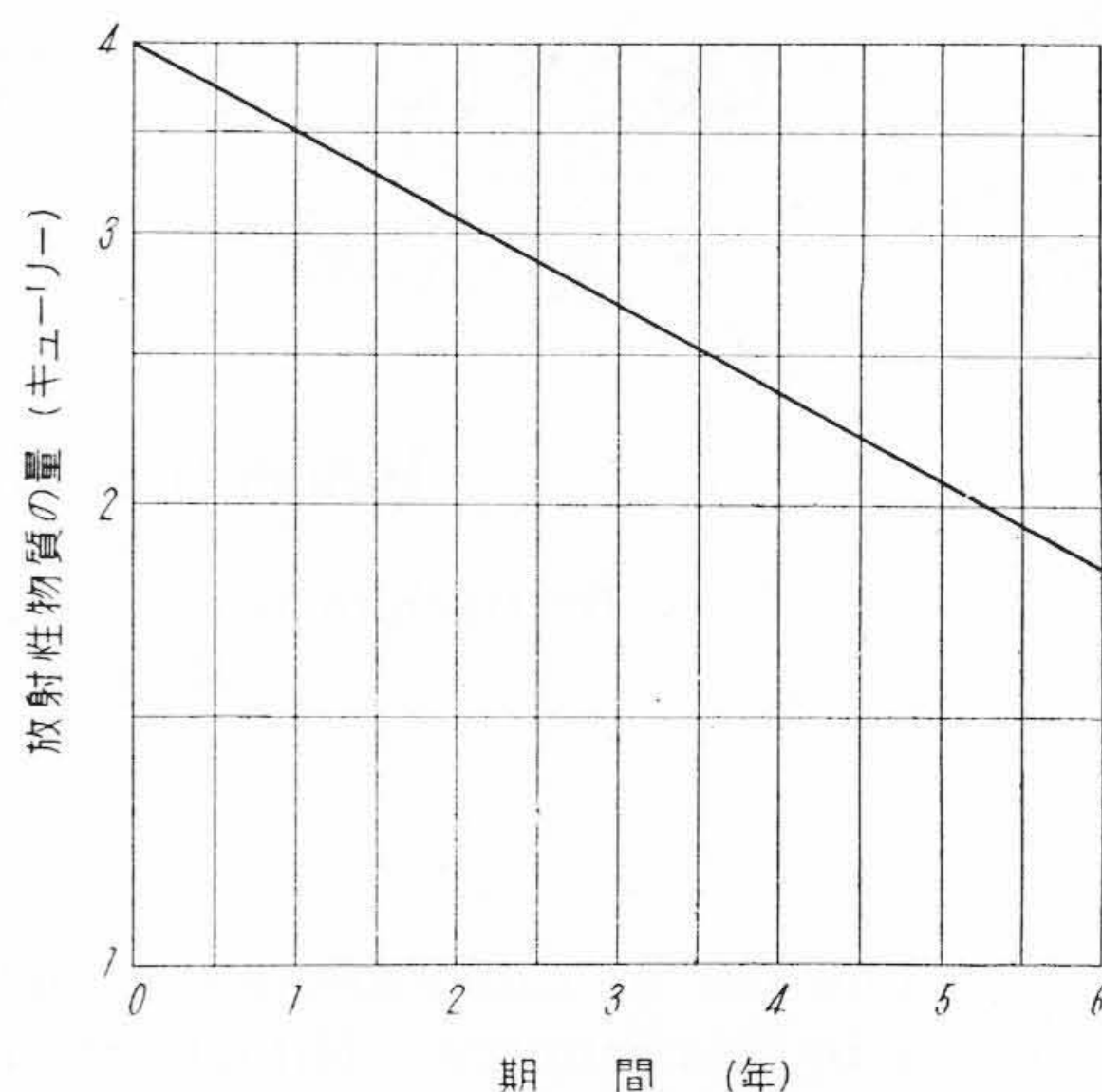
鉛	鉄	アルミニウム	銅
13mm	22.4mm	66mm	21.1mm

コンクリートは多くの種類があるが、普通のものは、アルミニウムとほぼ等しい⁽³⁾。またこの厚みは近似的に密度に比例すると考えて差つかえない。後述するようにこの値からγ線の遮蔽や漏洩について計算できる。

4キュリーのCo⁶⁰による放射線検査が実用的に可能な最大肉厚は、鋳鋼材にて約200mmである。1,000,000V X線発生装置では約120mm、300,000V X線発生装置では約70mmである。筆者らのCo⁶⁰使用の目的は、大形鋳鋼品の検査であるから、このCo⁶⁰の性質は非常に有用である。

Co⁶⁰のγ線は2種類のγ線よりなることと、ラジウムのγ線のエネルギーより高いエネルギーを持つことによつて、1キュリーのCo⁶⁰の放射線の強さは、1.6g

* 電子1箇を1 Voltの電位差で加速した時、その電子の獲得するエネルギーの量を1eV(電子ボルト)とする。1MeVは 10^6 eVである。

第2図 Co⁶⁰ の崩壊量と期間Fig.2. Co⁶⁰ Decay Curve

のラジウムのそれと等しい。したがつて4キュリーのCo⁶⁰は6.4gのラジウムに相当する。

放射性物質は時間とともに次第に崩壊して行くが、その分量は、現存する放射性物質の量と時間とに比例する。今、最初のCo⁶⁰の量を N_0 とすれば、 t 時間後のCo⁶⁰の量 N は次式で示される。

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

ここに λ は崩壊常数である。

t の単位を月にとれば $\lambda = 0.0109$ となる。

第2図に4キュリーのCo⁶⁰の崩壊と時間(単位を年とした)との関係を示す。Co⁶⁰の半減期は5.3年である。半減期のながいことは、使用可能期間が長いことであり、輸入によらなければならない我国の実状に適している。

〔III〕 試験場と設備

(1) 試験場とCo⁶⁰の格納

1ミリキュリーのCo⁶⁰から1mはなれた所のγ線量は1.35mr/h**である。すなわち、 a ミリキュリーのCo⁶⁰から d mはなれた所のγ線量 R mr/hは次式で示される。

$$R = \frac{1.35 \times a}{d^2}$$

したがつて、4キュリーのCo⁶⁰からの放射線量と、放射線源からの距離との関係は第1表の通りである。

人体に無害とされているX線およびγ線の最大許容量⁽⁴⁾は1週間につき300ミリレントゲンである。1時間

** γ線とX線の線量の単位をレントゲンという。レントゲン(r)はγ線またはX線の照射により、乾燥空気0.001293gごとに放出される粒子をして、空気中にそれぞれ1静電単位の電氣量を有する正、負イオン群を生ぜしめるγ線またはX線の線量をいう。1rの1,000分の1をミリレントゲン(mr)という。

第1表 γ 線量と放射線源からの距離

Table 1. Radiation Intensity and Distance from Source

距離 (m)	0.5	1	2	5	10	20	30	40
線量 (mr/h)	21,600	5,400	1,350	216	54	13.5	6.0	3.4

当りの最大許容量は、1週6日、1日8時間労働として6.25 mr/h とされている。また 25 レントゲン以上を短時間にうけたときは、急性傷害をうけるといわれている。

よつて第1表に示した強力な γ 線から、放射線検査従事者および一般従業員を保護するためには、周到な管理と十分な遮蔽とが必要である。筆者らは放射線試験場を建屋よりはなれた野外に定めて、一般従業員から隔離し、第3図および第4図に示す鉛製球形容器とコンクリート製格納庫を設けて Co⁶⁰ を収め、大容量の Co⁶⁰ を移動させることなく、安全にしかも容易に放射線検査を行うよう計画した。検査すべき部品は台車にのせて、工場より格納庫の前に運ぶ。

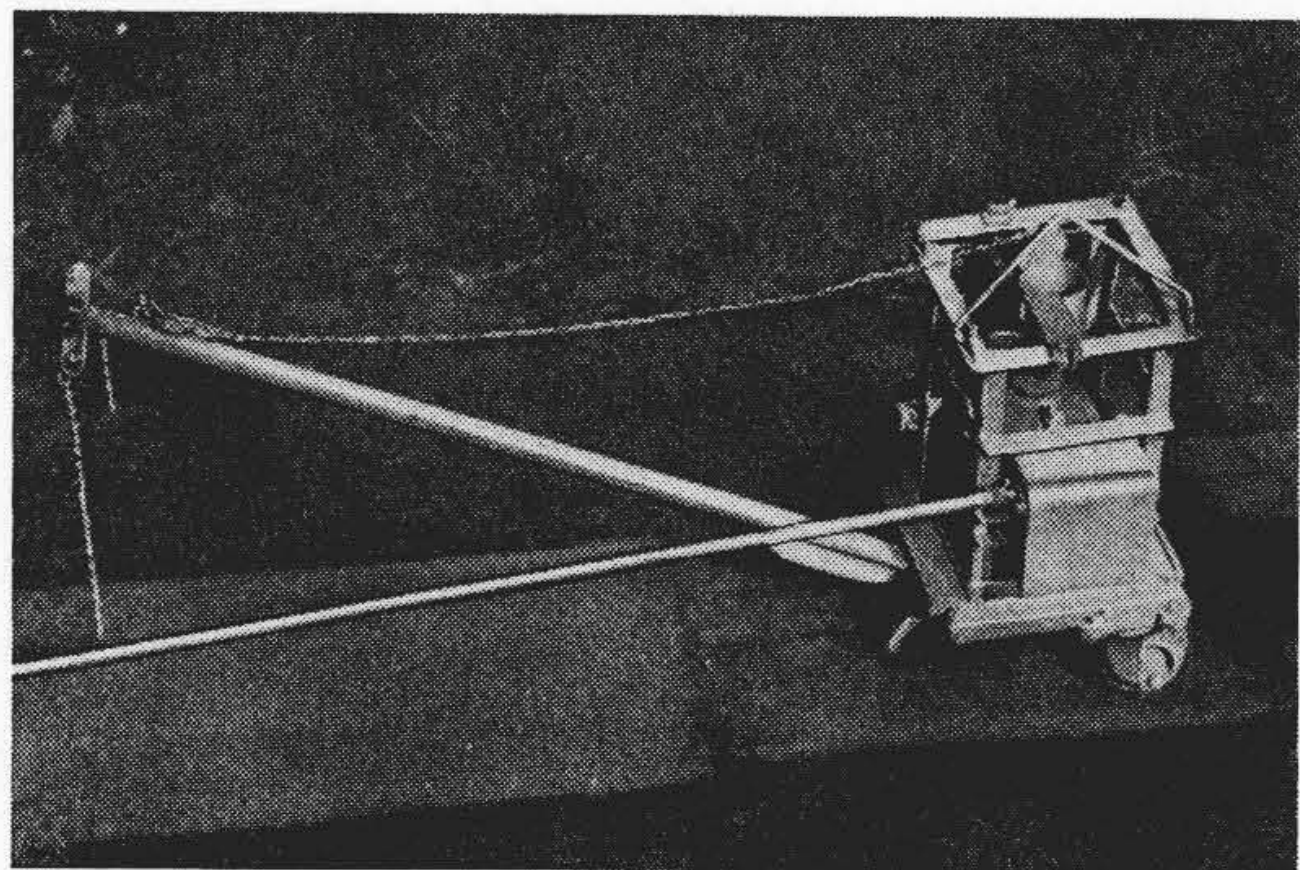
鉛容器の直径は 224 mm, コンクリート格納庫の壁の厚さは 200 mm, 遠隔操作側の壁は 250 mm とした。これらの厚みは文部省大学学術局研究助成課より配布されている「放射性同位元素の安全取扱法」⁽⁵⁾ によつて定めたものである。前章に示した、材料特有の放射線減衰能力によつて計算した結果もほとんど同様である。格納庫より漏れる γ 線量を実測した値は、壁際で 1~5.5 mr/h であった。

Co⁶⁰は台車上の被写体を照射するのに適当な高さに保持してある。被写体に対するフィルムなどの撮影準備が終れば、格納庫の前扉を開き、上方に向いている鉛容器の開口の鉛栓を抜き、容器を90度前方に回転して、 γ 線照射を行う。すべての操作はコンクリート壁の外側より行う。

被写体をこえて進む γ 線は、まだ強力ではなはだしい放射能傷害を起しうる。よつて被写体の後方の位置へ、十分に大きく、厚い土堤を築き、使命を終つた γ 線をさえぎり、危害の予防に備えた。土堤の厚みは、土壤の放射線減衰能力より定めた。第5図は放射線検査の実施の状況である。

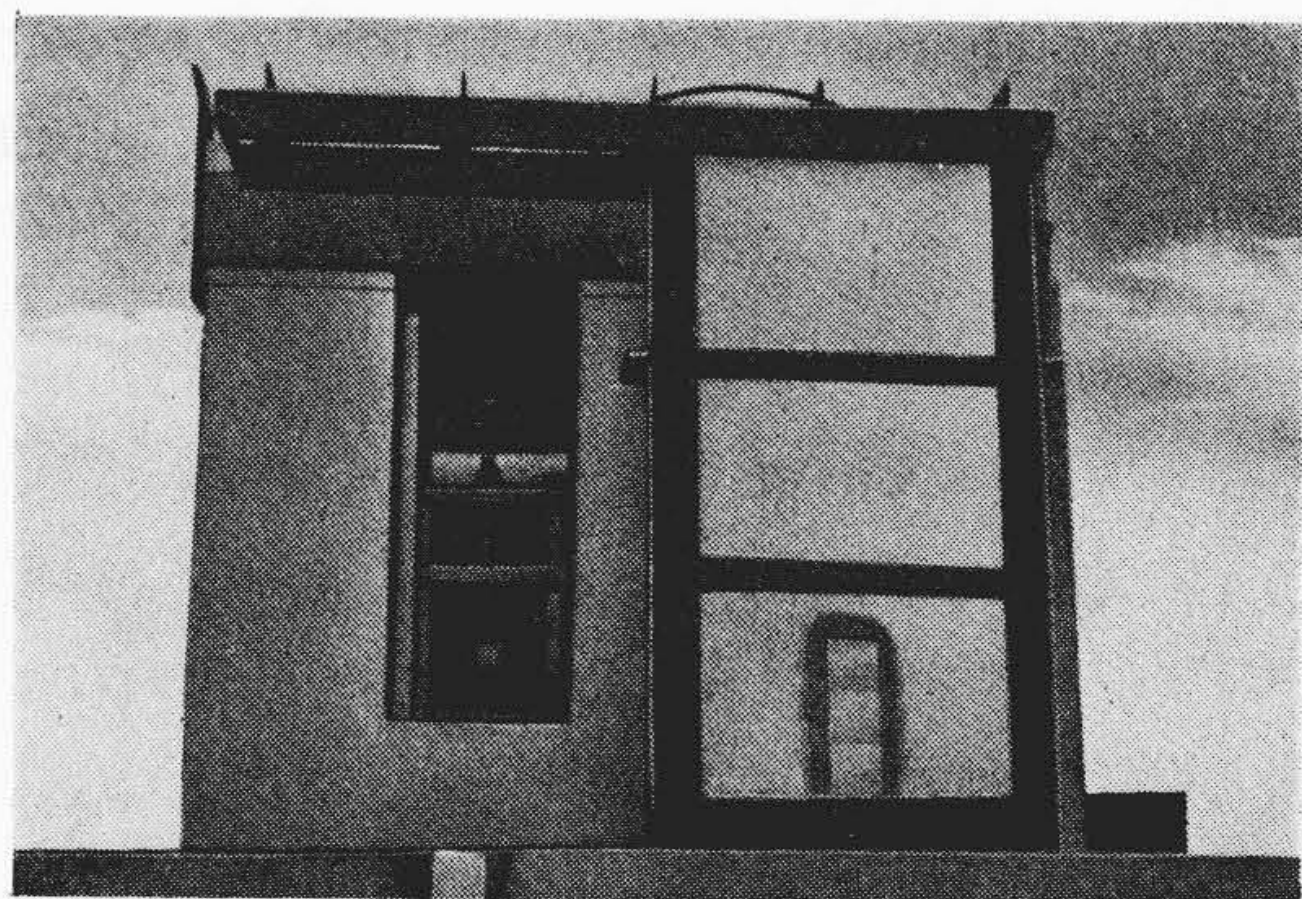
(2) ガイガー、ミューラー計数管

このように、放射線検査従事者と一般従業員の安全確保のため、鉛容器とコンクリート製格納庫を設けて Co⁶⁰ を収容し、試験場を工場より隔離したほか、科学技術行政協議会の発表した障害予防勧告⁽⁶⁾などに準拠して、検査従事者のフィルムバッヂとポケットチェンバーの着用、定期的血液検査など安全管理に万全を期している。一般に Co⁶⁰ を工業的に利用する場合、その放射線量の測定は、イオン・チェンバー・タイプの計器またはガイガー・

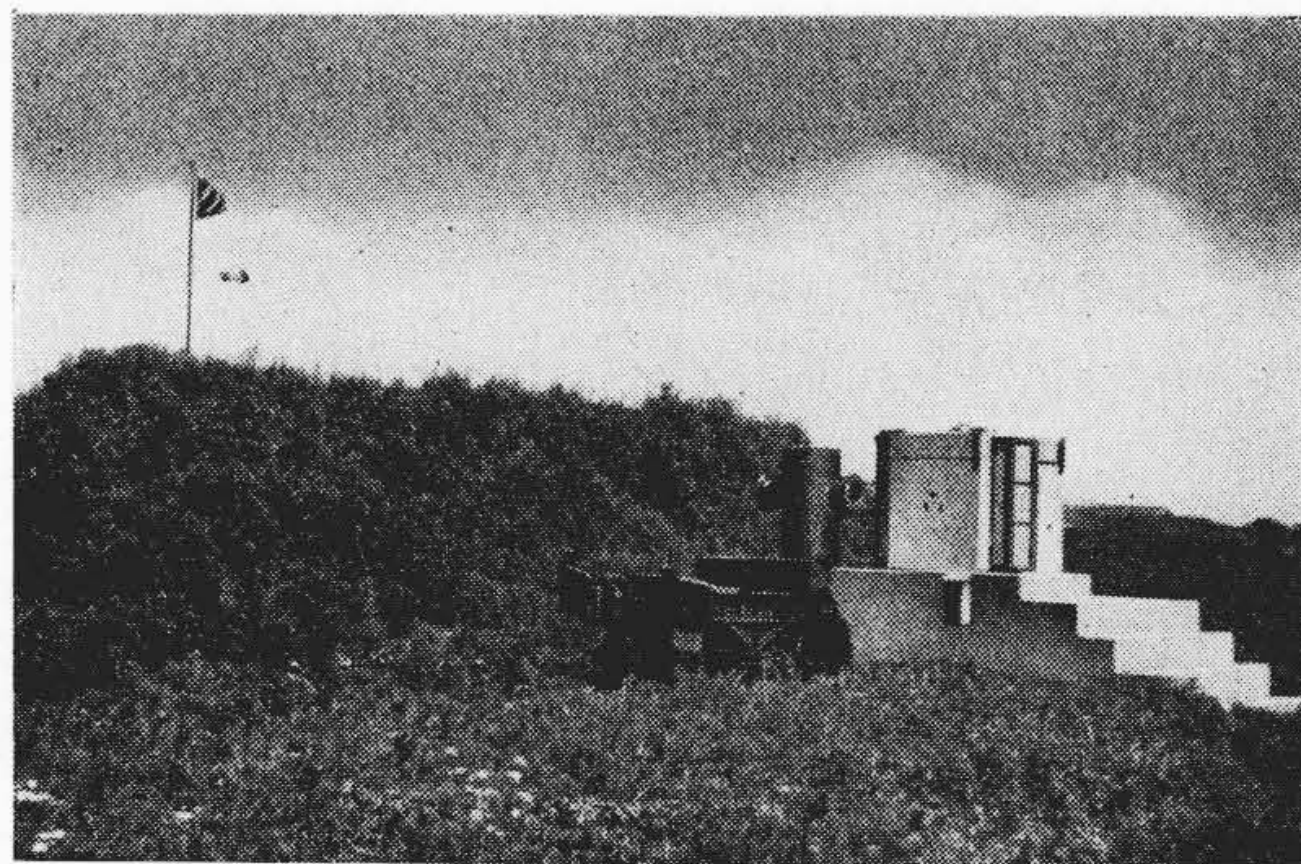


第3図 鉛製球形容器

Fig.3. Lead Shielding Container

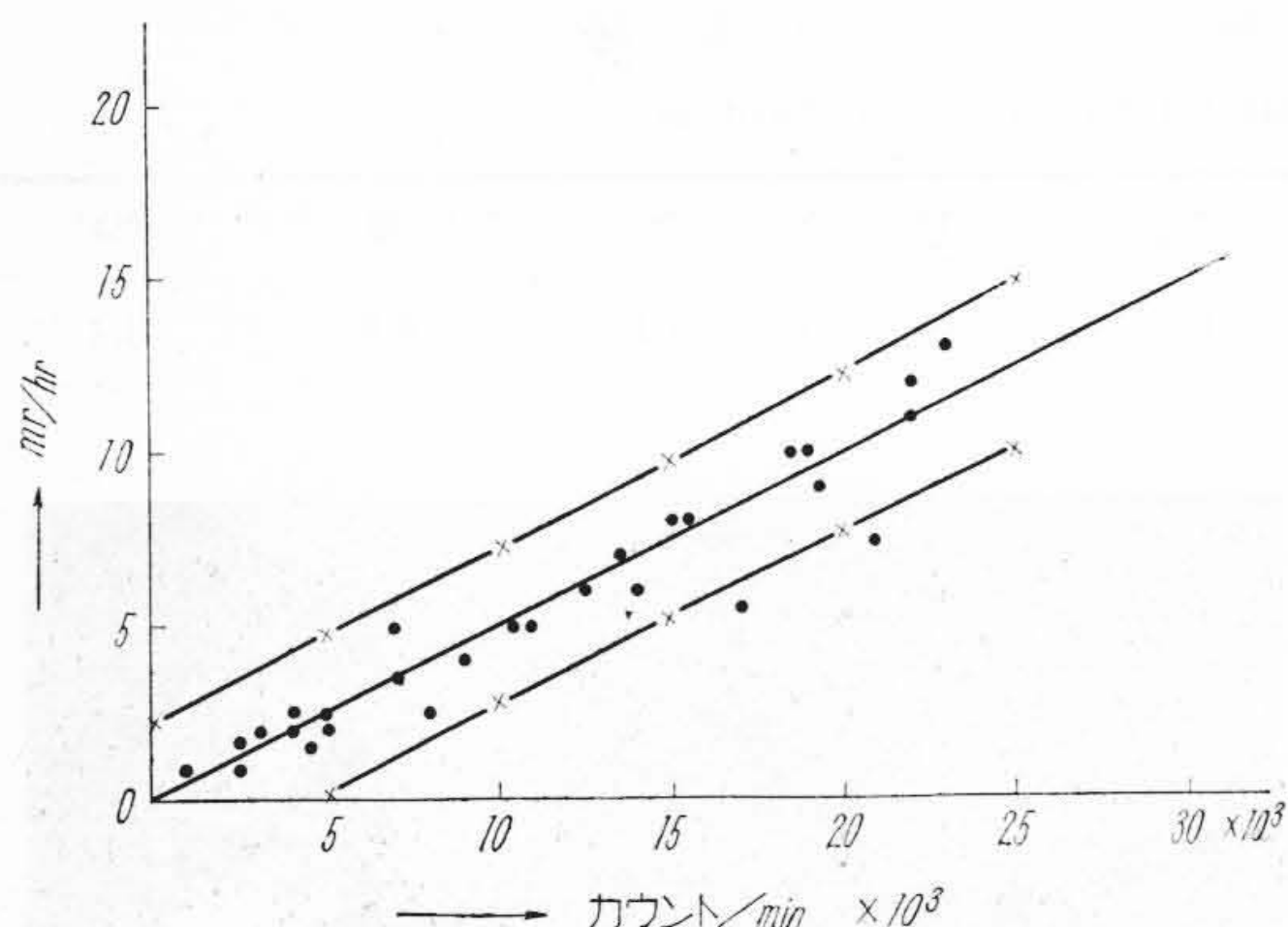


第4図 コンクリート製格納庫

Fig.4. Concrete Shed of Co⁶⁰

第5図 放射線検査の状況

Fig.5. Steel Casting under Inspection by Co⁶⁰ Radiography



第6図 Co^{60} に対するガイガー・ミュラー管とミリレントゲンとの換算表

Fig. 6. Counts Per Minute of Geiger Mueller Tube vs. Milliröntgen Per Hour for Co^{60}

ミュラー計数管を用いる。ガイガー・ミュラー計数管は放射線量を1分間当りのカウント数で指示するからあらかじめ放射線の安全許容範囲を示す単位mr/hとの関連を知る必要がある。筆者らが Co^{60} について求めたカウント/minとmr/hとの関係を第6図に示した。カウントは放射能のもつエネルギーの大きさつまり放射線の種類によつて異なるものであるから、このグラフは Co^{60} のみに適用されるものである。

〔IV〕 Co^{60} による放射線検査

(1) Co^{60} による放射線検査の長所と短所

Co^{60} の γ 線を利用する放射線検査の長、短所は、一般にはつぎの点があげられている。

長 所

1. 設備費、維持費が安い。超高压X線装置のおよそ1/100 ぐらいの価格で購入できる。
2. 肉厚の変化の広い範囲にわたつて、平均した鮮明な写真がえられる。
3. 移動が容易であること、狭い所にも入ること。
4. 透過力の強いこと。
5. 故障の心配がないこと。
6. 装置や操作が簡単であること。

その反面、つぎの点は Co^{60} の短所である。

短 所

1. 透過写真の撮影に長時間を要すること。
2. γ 線写真はコントラストが弱く、映像の輪廓がはつきりせず、鮮明度の落ちること。その結果、X線写真の検出能力は肉厚の2% 以上とれるのに対し、 γ 線写真のそれは3% である。
3. 常に有害な γ 線を放射しているから、管理や人体の保護が面倒であること。

実際に筆者らが Co^{60} を利用して鋳鋼品の γ 線写真撮影を行うにあたり、最も恩恵にあづかつた点は、第2の長所—肉厚の変化に対する広い寛容度であつた。鋳物の特色として、検査を要するところは肉厚の変化するところであることが多いからである。最も対策に苦心をしている短所は、長時間を要することである。できるだけ短い時間で製品を完成することは、顧客の常に切望するところであり、生産者としても、原価を下げる重要な要素であるからである。高感度のフィルムの使用、夜間の利用などにより、できるだけこの欠点を克服するよう努力している。第3の短所は、完全な対策により解消した。

(2) フィルムの選定

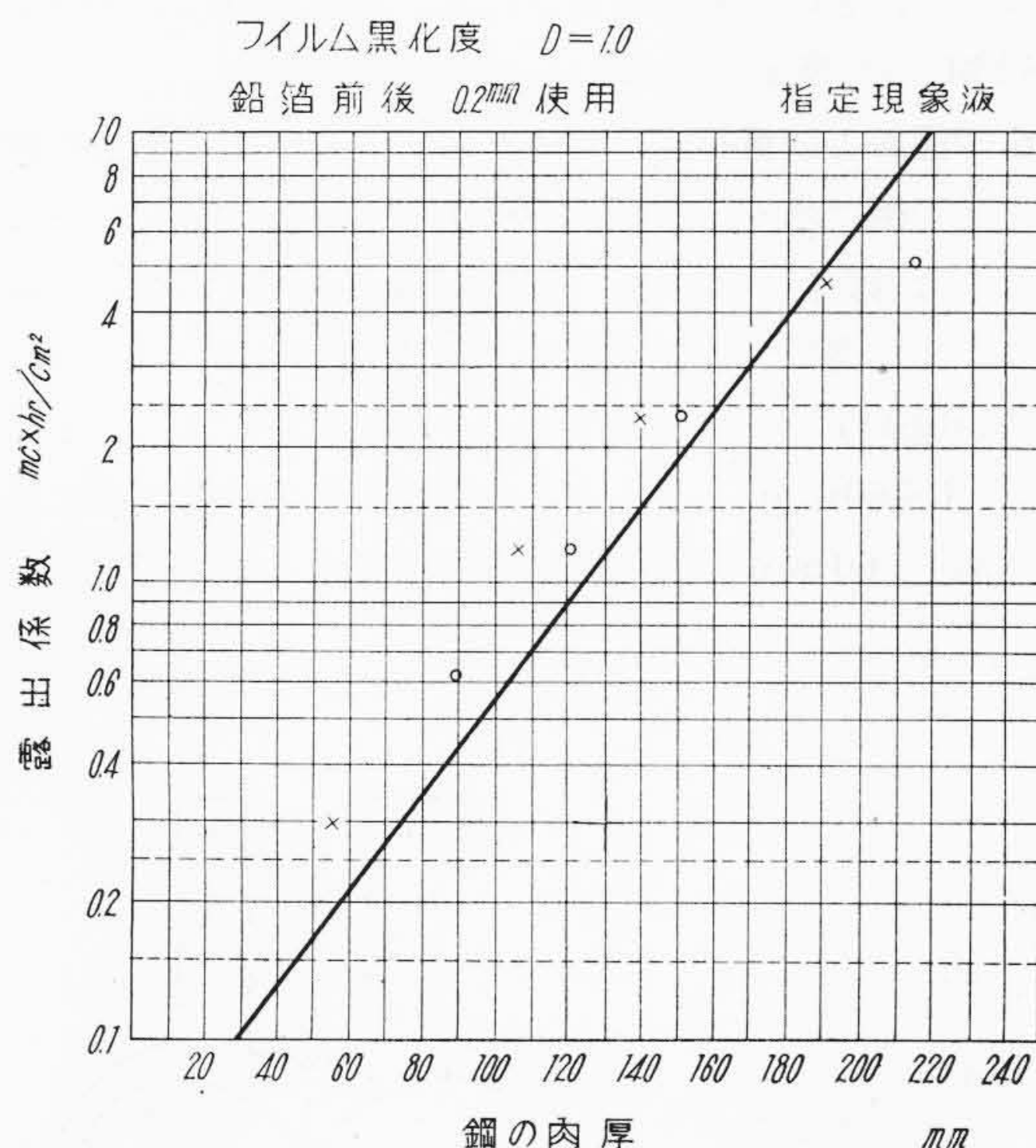
放射線検査は放射線源、被写体、フィルムの三要素で構成される。なかでも、フィルムの使用方法是検査の成否に大きく影響する。放射線源、いゝかえると、放射線のエネルギーの高低に応じて、数種類のフィルムが販売されており、その選定を誤ると、検査の目的を達せられない。フィルムを使用する際、散乱放射線を防ぎ、増感効果をうるため、鉛箔をもつてフィルムの前後を覆うのが一般である。散乱線を防ぐためには、厚い方がよいが、厚さを増せば γ 線をいたずらに吸収するから、増感作用の最大の厚みを基準に定める。鉛箔の厚みは0.2~0.25 mm が最も増感作用が強く、0.4 mm になると、かえつて効果が落ちるとされている。筆者らの簡単な実験では0.2 mm の場合最も大きな増感効果をえた。

γ 線に適するフィルムには、イーストマン・コダック社のノンスクリーンタイプ、イルフォード社のGタイプなどの製品があるが、いずれも外国製品である。これらの外国製フィルムの品質については、すでに定評があるが、入手には相当長期間を要するため、はなはだ不都合が多い。国内のフィルム会社も、少量を試作し、市販しはじめた。まだその品質は不明で、信頼性は薄い。しかしながら、外国製 γ 線用フィルムは入手困難であるから、入手の容易なX線用フィルムを使用するか、国産のフィルムを使用せざるをえぬ。筆者らは特殊な場合を除き、主として国産の γ 線用フィルムに依存して、放射線検査を実施している。国産フィルムの使用に当つてはあらかじめ、その性能を調査し、必要な露出表を求めた。第7図および第8図は筆者らがF社のフィルムについて求めた露出表と特性曲線である。また第9図はそのとき用いた鋼片試料である。

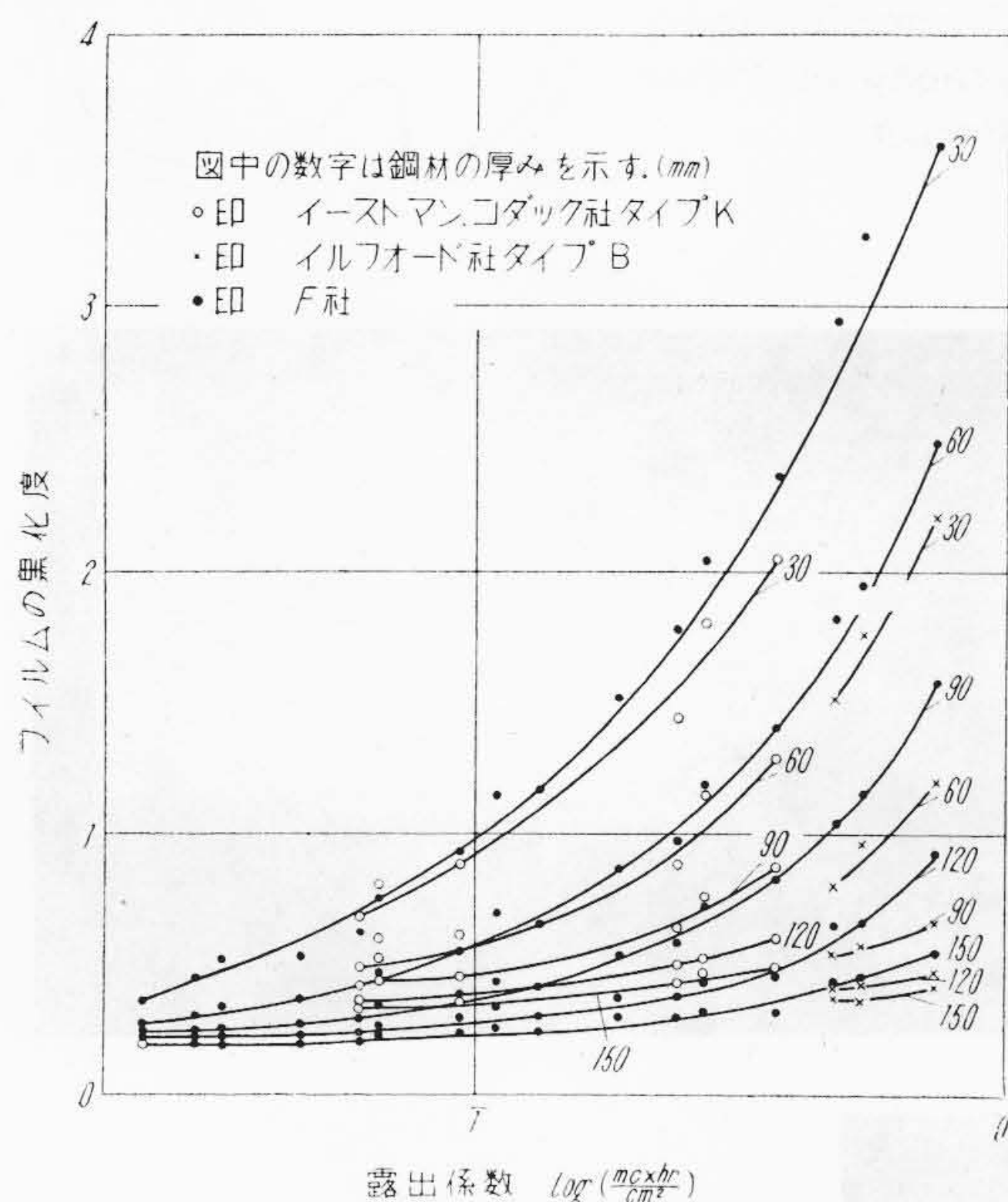
露出表第7図はフィルム品質改善の結果、F社のすでに発表していた露出表と相当差異があつた。筆者らは第2図と第7図により、露出条件を決定している。

(3) フィルムの特性の比較

第8図中に示してあるイーストマン・コダック社のK



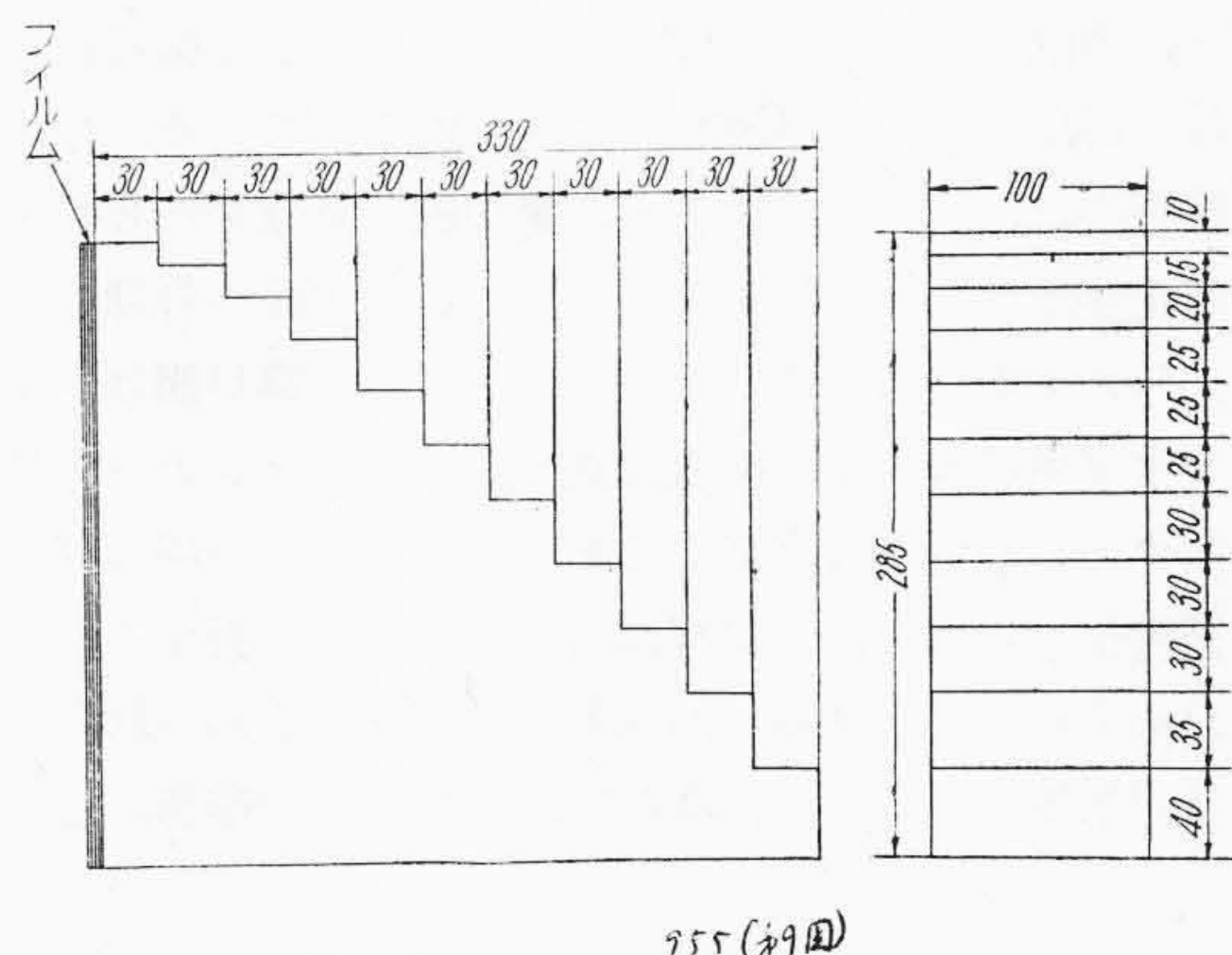
第7図 γ 線用フィルムの露出表
Fig.7. Exposure Factor vs. Steel Thickness



第8図 r 線用フィルムの特性曲線
Fig. 8. Characteristic Curve of Film

タイプ・フィルムの特性曲線は比較の資料として、同時に求めたものである。同図中には、イルフォード社のBタイプ・フィルムをも求めておいたが、その使用条件、すなわち特性がはなはだ相異なる故、比較できない。これらのフィルムの前後には、厚さ0.2mmの鉛箔を用い、また現像を同一条件にするため、全数同時現像を行つた。

F社のフィルムの特性曲線と、コダック社の特性曲線



第9図 フィルム特性曲線調査用試料
Fig.9. Steel Piece for Characteristic Curve of Film

を比較すれば全体としては両者が接近して、良く似ているが、なおつぎのことがわかる。

1. 肉厚の薄い方では、F社のフィルムの曲線の方がコダック社のそれより傾斜が大きい。すなわちF社の方が、フィルム・コントラストが大きいから、細かい欠陥の検出能力が良い。
2. コダック社のフィルムは肉厚 120 mm, 150 mm の場合、F社のフィルムに比して、同一露出の黒化度の差が小さい。すなわち肉厚の変化に伴うコントラストが、F社のフィルムの方が大きいから、細かい欠陥の検出に有利である。
3. 黒化度の低い範囲では、コダック社のフィルムの感光度が高いが、黒化度 1.0~1.5 になると、逆にF社のフィルムの感光度が高くなっている。

コダック社のKタイプ・フィルムとF社のr線用フィルムとの使用条件は同一でないこと、実験に使用したフィルムの経歴にも差があること、コダック社指定の現像条件でないことなどから、**第8図**によりたゞちにフィルムの優劣を決定することは早計にすぎる。しかし少なくとも、F社のr線用フィルムは、安定しているならば、十分良い特性を有しているといえよう。

(4) 検査の計画

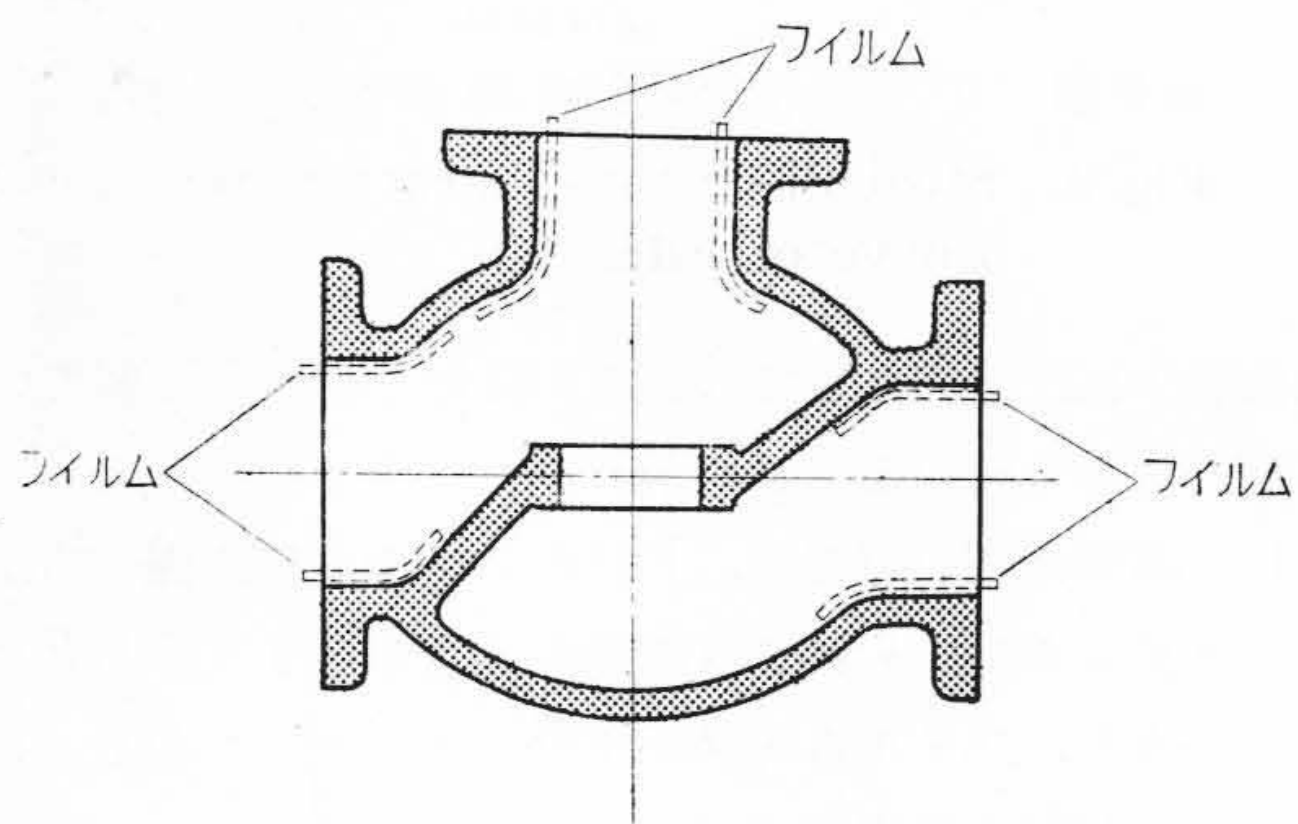
筆者らの検査対象は主として蒸気タービンの主要鑄鋼部品すなわち高圧ケーシング、高圧蒸気弁室、主塞止弁体、水車の主要鑄鋼部品、すなわちペルトン水車用バケット、カプラン水車用ランナーブレードなどである。これら部品の全表面積について γ 線写真をとることは、技術的にかならずしも有効適切でないし、はなはだしい時間の浪費となるから、鑄造欠陥の内在が予想される部分、その位置が部品としてはなはだ好ましくない部分、内部欠陥のないことを確認しなければならない部分などを検査の対象としている。すなわち、肉の交叉部、肉厚の変

化部、角隅部、高応力部などである。また溶接構造鋳鋼部品の溶接部もこの Co^{60} によって検査している。今この検査の二、三例をあげると、第10図は蒸気タービン用主塞止弁本体の検査計画図であり、鑄造欠陥の懸念のある部分に r 線検査を指定している。つぎに第11図はペルトン水車用バケットの検査計画図を示す。ランナー・ディスクとの取付部は高応力であり、万一折損の場合非常に被害があるから、 r 線写真により嚴重に調査する。

求められた r 線写真に内部欠陥の存在が認められたときは、基準にてらし、部品の廃却、欠陥部の補修、その

まゝ使用などの処置が決定される。その基準の一つに ASTM の標準 r 線写真⁽⁷⁾が公表されている。

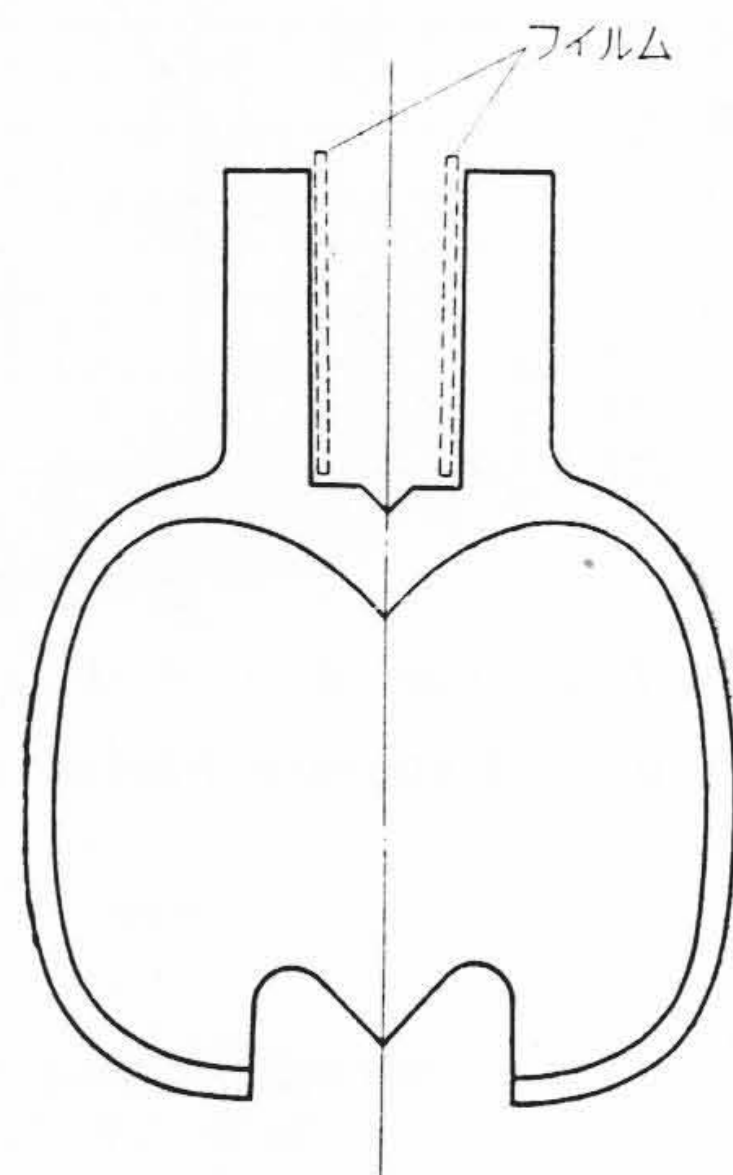
第12図および第13図は r 線の広い寛容度を利用した検査方法の例であり、直径約 60mm の円柱形のテスト・ピースの r 線写真を示す。円柱の中心を通る r 線は、直径に等しい肉厚を通過するが、中心からへだたるにつれ、 r 線の通過する肉厚は減少し、ついには 0 となる。すなわち、0~60mm という大きな肉厚変化のある部品の検査である。60mm の肉厚の部分の写真をうるに適当した



第10図 高压用主塞止弁の r 線検査計画図
Fig. 10. Scheme for Radiography of Valve Body

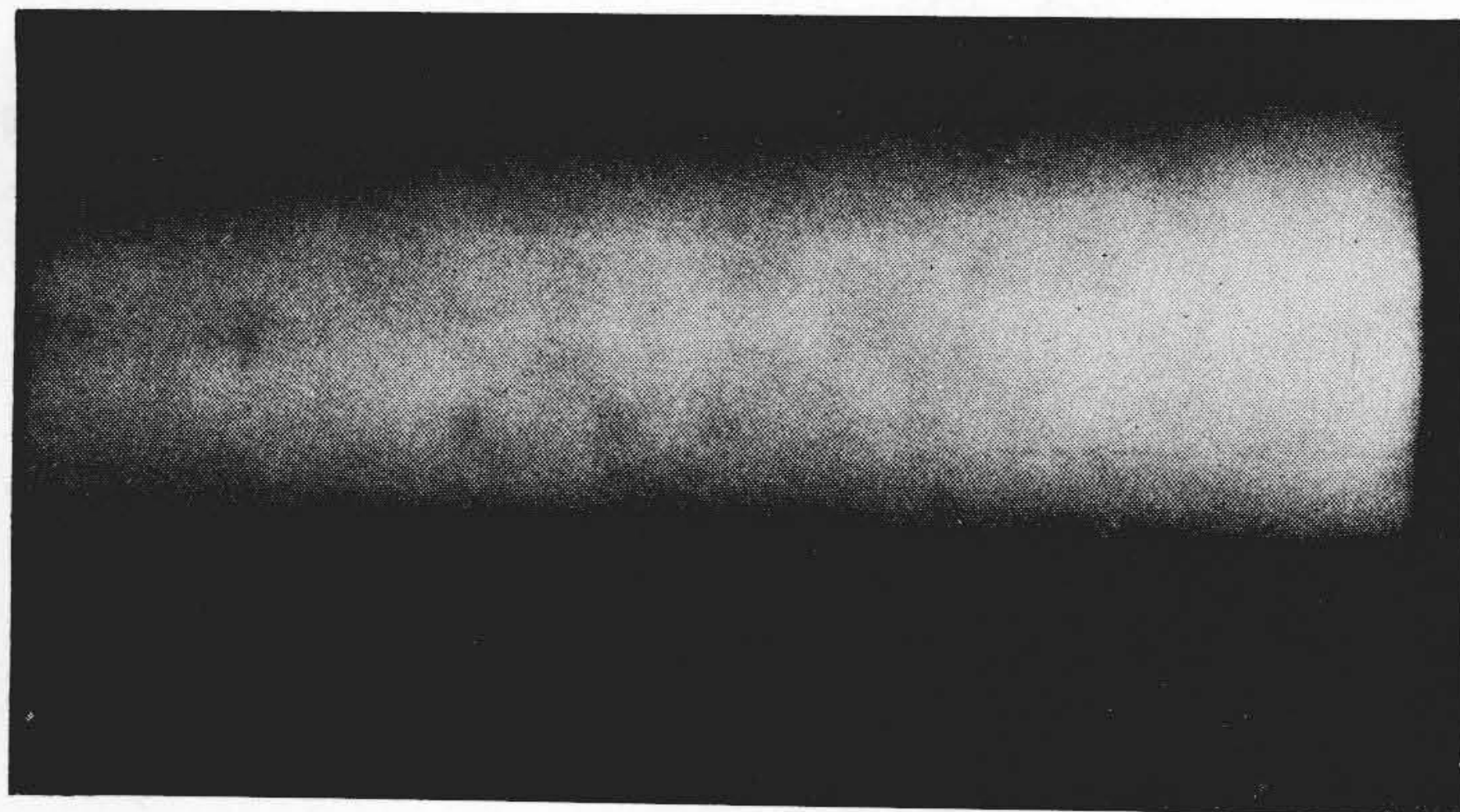
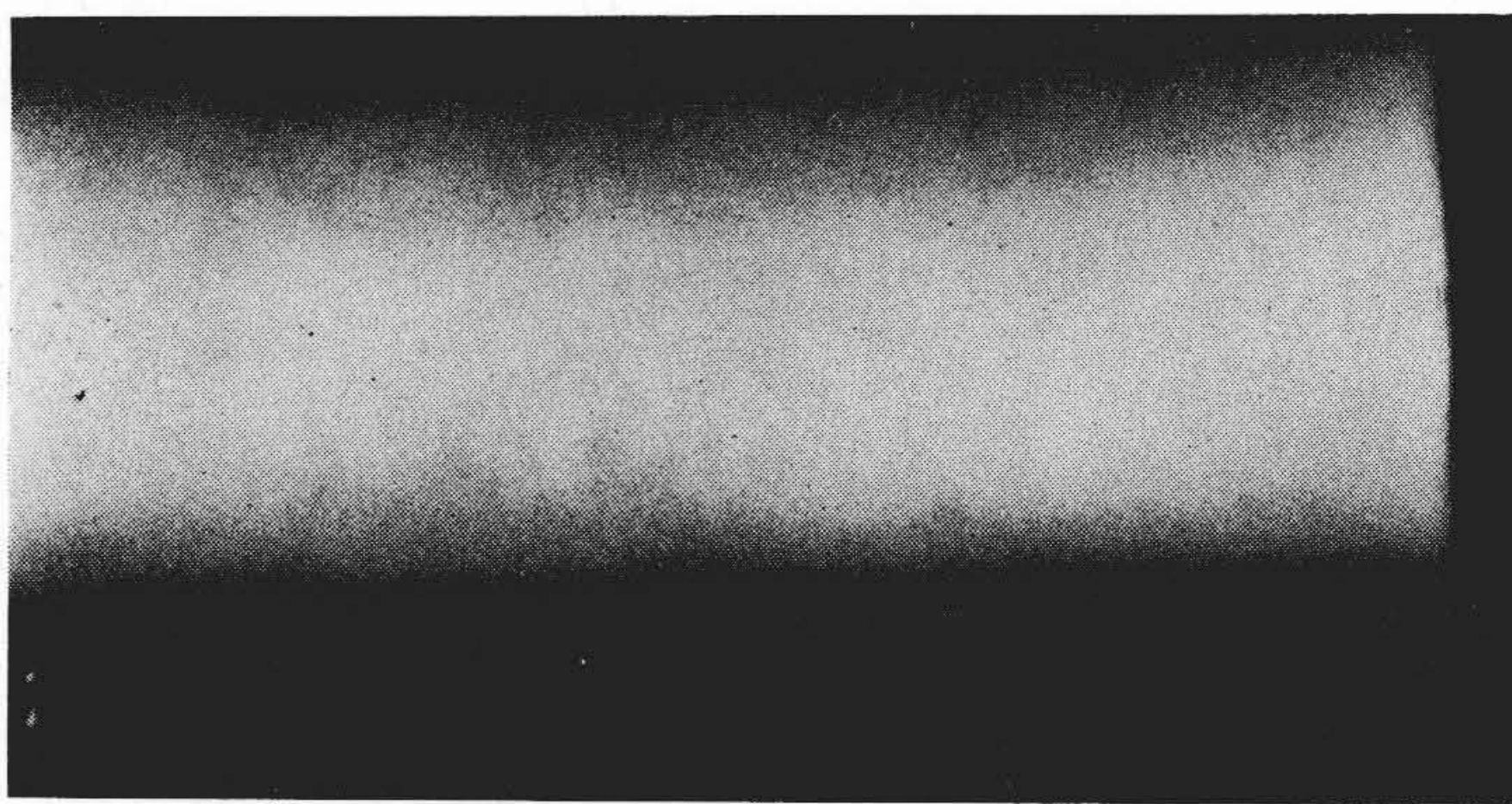
第11図
ペルトン水車のバケットの r 線検査計画図

Fig. 11.
Scheme for Radiography of Pelton Bucket



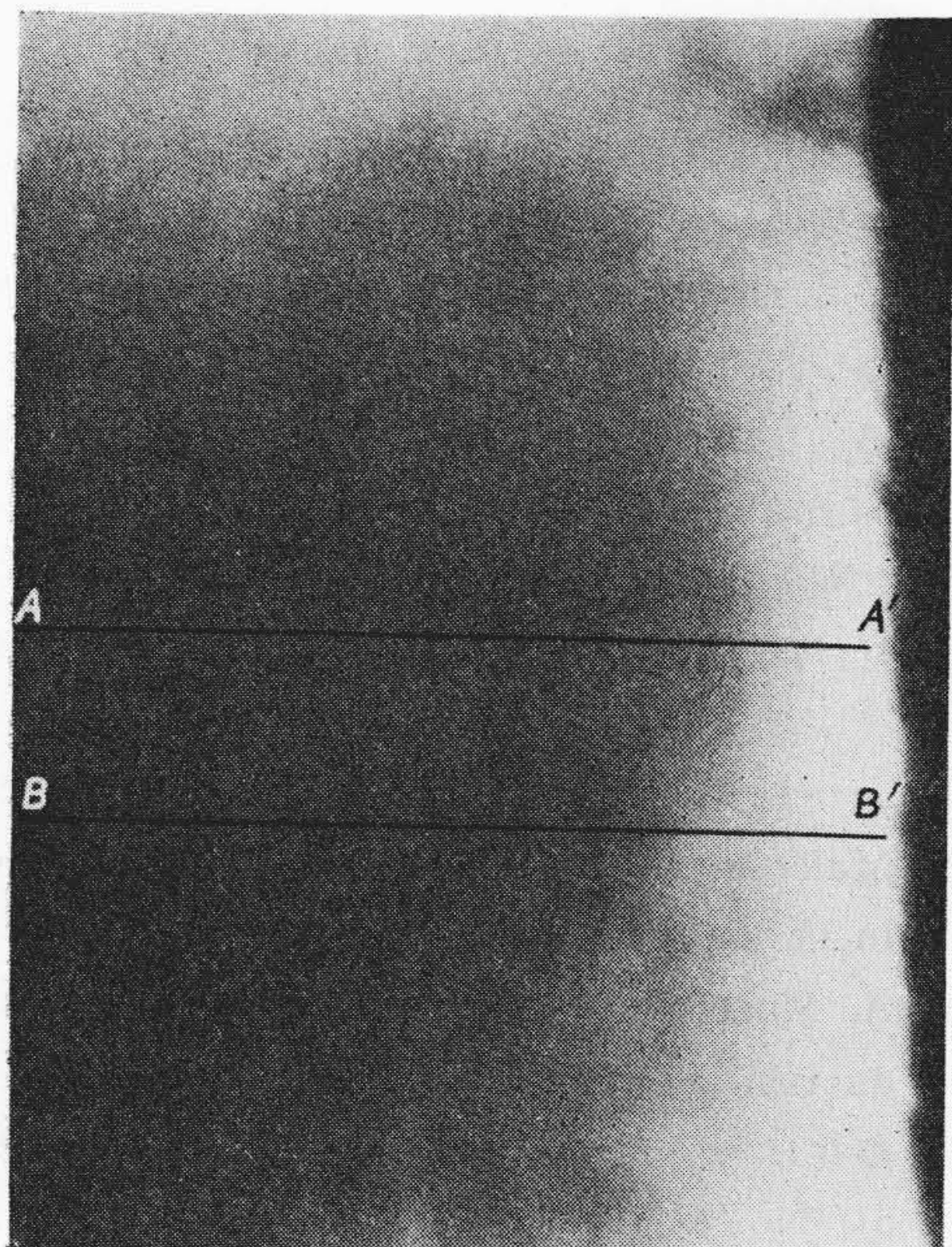
第12図 肉厚の薄い部分に対する r 線写真

Fig. 12. Co^{60} Radiograph of thin Part Columnac Casting



第13図 肉厚の厚い部分に対する r 線写真

Fig. 13. Co^{60} Radiograph of Thick Part of Columnac Casting

第14図 引けの γ 線写真(その1)Fig. 14. Co⁶⁰ Radiograph of Internal Shrinkage

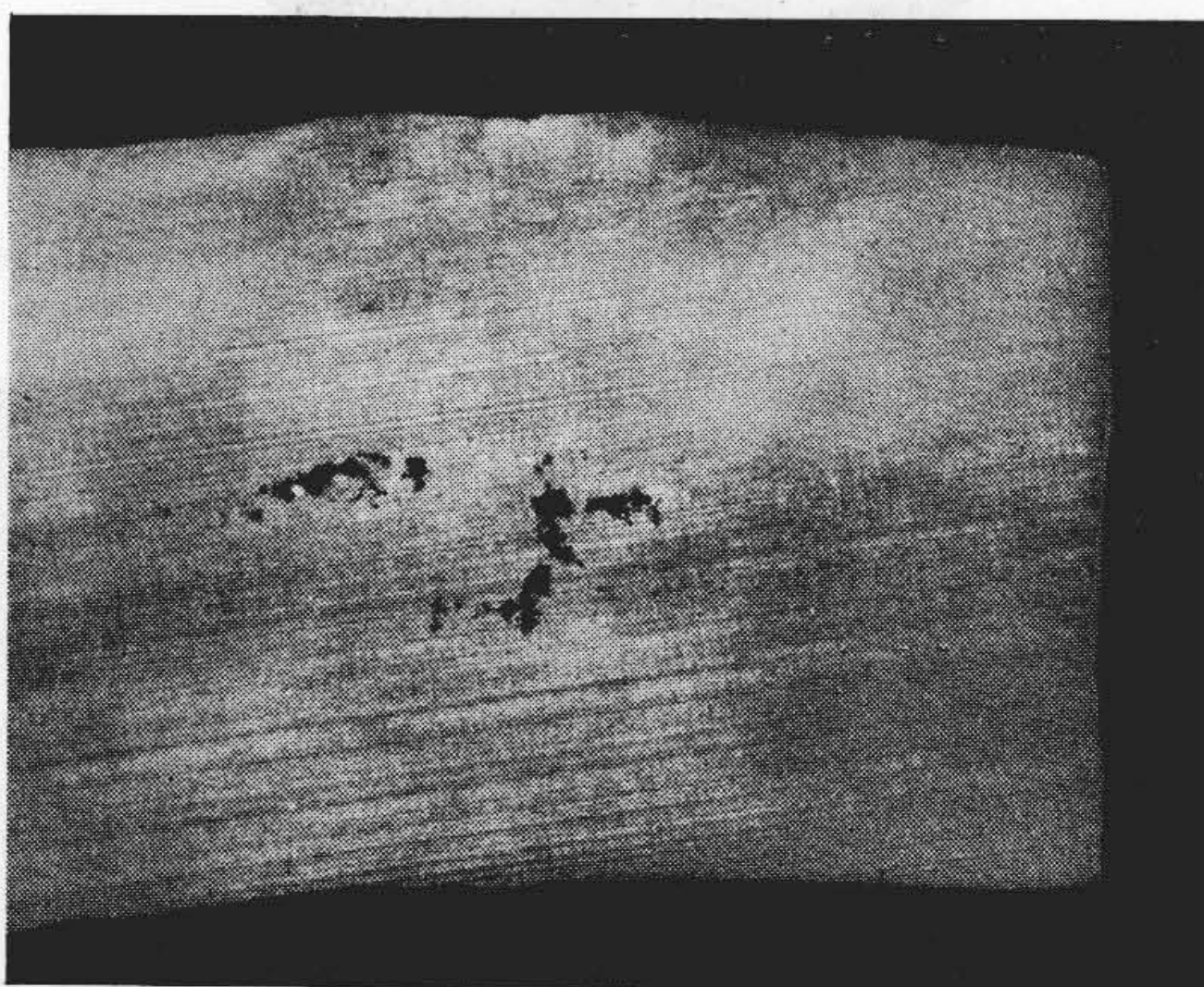
フィルムと、薄肉の部分の写真をうるに良いフィルムとを、同時に同一フィルム・ホルダーに入れて撮影することによつて、この目的をはたしうる。第12図は薄い部分に対する写真である。写像の周辺部は明瞭であるが、中央の部分は露出不足で白すぎる。第13図は厚い部分に対する写真である。写像の中央の部分は黒化度が適当で、良く詳細を示しているが、周辺部は露出がすぎて黒くなりすぎた。2枚の写真を総合して全体をくまなく検査できる。この方法を採用することにより、総検査時間は約1/2に短縮される。長い時間を必要とする γ 線写真にとつて、大変有効な方法である。もつと肉厚の変化の大きい場合に、3種類のフィルムを組合せて、一時に検査することも行つている。

(5) γ 線写真の例

実際の γ 線写真より、その典型的な例をあげる。いずれも試料として内部欠陥を持つよう特別に鑄造したものの γ 線写真である。

(A) 引 け

第14図および第15図は引けの γ 線写真例である。第14図は肉の厚い鑄物である。写真上方の白い部分は、肉厚が急激に増しているため、黒化度不足となつた所である。下方の三条の白い縦線はペネトラメーターの像である。左の細い線は見え難いが、肉厚の2%に相当する鋼線、中央の線は3%、右の太い線は4%の鋼線の像である。横に引いたA—A'、B—B'線の間を、試料として切り

第15図 引けの γ 線写真(その2)Fig. 15. Co⁶⁰ Radiograph of Internal Shrinkage

第16図 引けの横断外観写真

Fig. 16. Internal Shrinkage

出し、引けを見ると、第16図のごとくである。第16図はB—B'線に相当する切断面の外観写真である。

第15図も引けの γ 線写真例である。写真の上下の周辺が白いのは、円筒状の試料に、外側から γ 線を照射して、内側にフィルムを当てて撮影したためである。上下の周辺に近づくにつれ、肉厚がだんだん厚くなつたことになり、フィルムの黒化度不足となつた結果である。

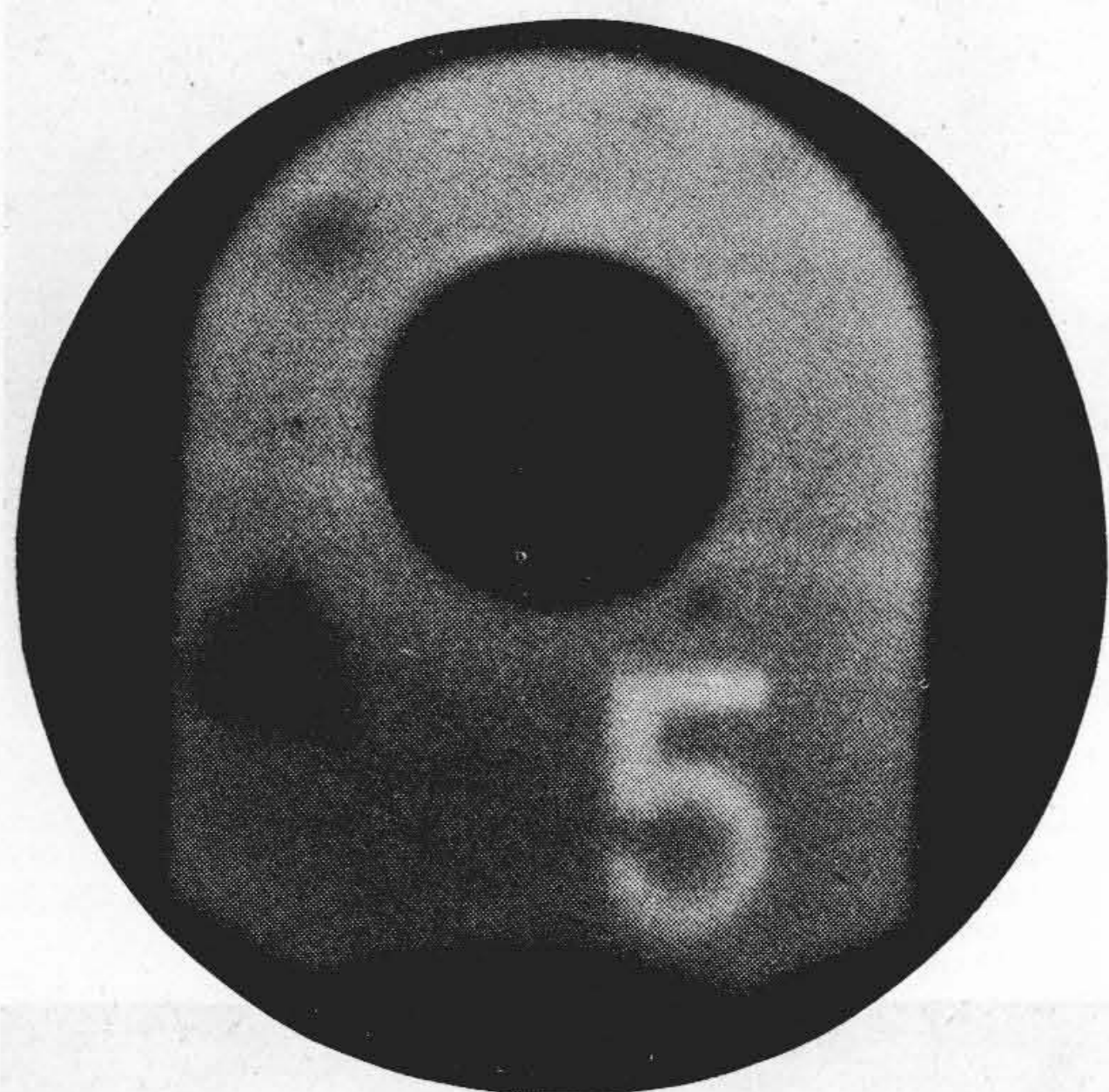
(B) ガス(ブロー)ホール

第17図および第18図(次頁参照)はガス(ブロー)ホールの γ 線写真例と、外観写真である。第18図は試料の肉厚

中心における横断面である。すべてのガスホールはかならずしも、この切断面に存在しないので、第17図および第18図の欠陥の数は一致していない。おたまじやくしのような形状に尾を引いている欠陥は、ガスホールと引けの合わさったものである。

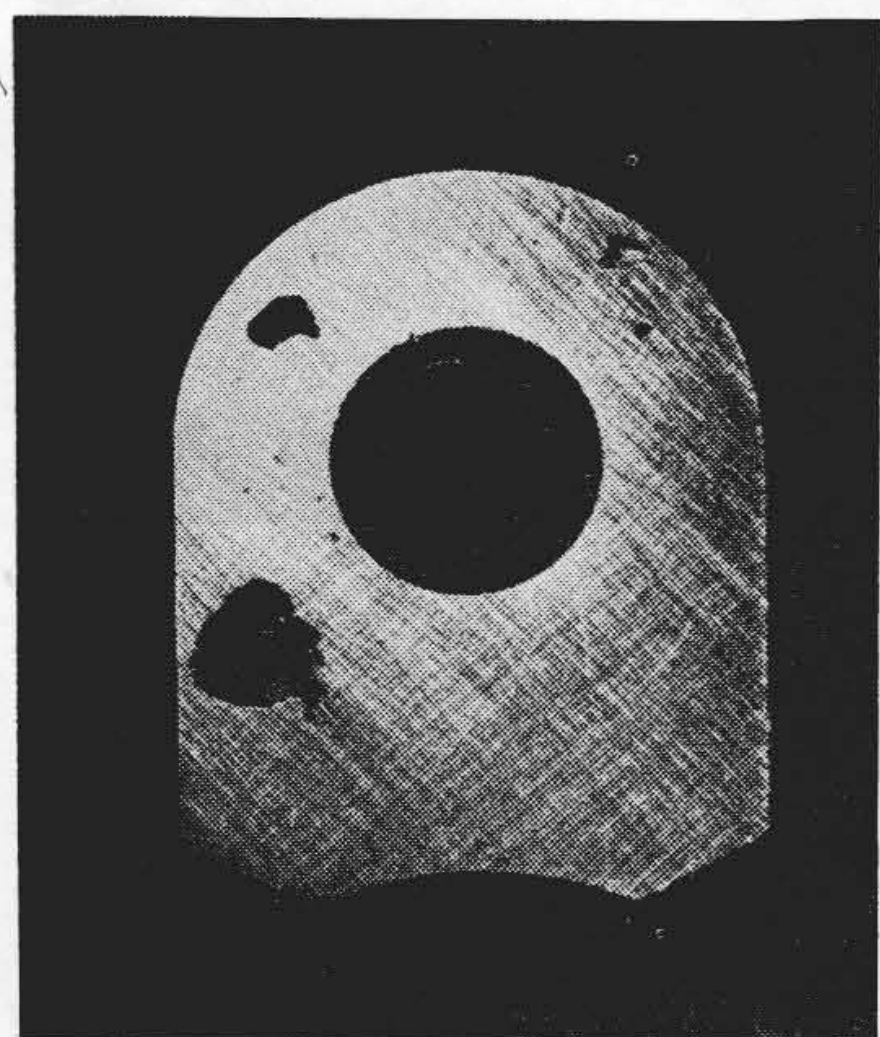
(C) 砂 か み

第19図は砂かみの一例である。左の試料に特に多数の砂かみが存在していることが示されている。



第17図 ガスホールのγ線写真

Fig. 17. Co⁶⁰ Radiograph of Gas and Blow Holes



第18図 ガスホールの外観

Fig. 18. Gas and Blow Holes

〔V〕 結 言

以上日立工場における4キューリーのCo⁶⁰による鋳造品の放射線検査について述べた。この検査は、その費用の安いこと、肉厚に大きな変化があつても実施できること、厚い肉厚品に対しても行えることなどの長所をもっている。したがって、主要鋳鋼部品に適用して、その品質の向上に大きな効果をあげている。

終りに種々御援助、御指導を賜った東京都立工業奨励館、F社、東大および科学研究所の方々に対し深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) Malcolm E. Reed: Cobalt-60 radiography in industry
- (2) A. Morrison: The use of Cobalt-60 for industrial radiography (1949)
- (3) 藤井: セメントコンクリート No. 63 7 (1952-5), No. 64 18 (1952-6), No. 65 31 (1952-7), No. 66 29 (1952-8)
- (4) 江藤: 人体と放射線 151 (1951)
- (5) National Bureau of Standards: Safe handling of radioactive isotopes (1949)
- (6) 科学技術行政協議会: 放射性物質による障害予防勧告 (1954)
- (7) ASTM: Standard E71-47T (1947)



第19図 砂かみのγ線写真

Fig. 19. Co⁶⁰ Radiograph of Sand Spots and Inclusions