

# EGS4 を用いた老朽度配管診断装置の改良（錆を含む配管厚の測定）

梶原 暁

(技術研究所)

## Improvement of the X-ray Piping Diagnostic System Using EGS4 (Measuring the Thickness of Piping with rust)

by Gyo Kajiwara

### Abstract

The X-ray piping diagnostic system was developed about 10 years ago, and it has been applied more than 500 times. Though it is a very practical system, it does not take into consideration the rust which sometimes accumulates in a pipe. Trial tests have been conducted to examine the influence by using EGS4 simulation code which was developed for simulating atomic reaction. The experimental results show more than 85 % accuracy in measurements. Thus giving a good reason to make the experimental system a practical one.

### 概要

X線による配管の老朽度診断システムは、開発して10年ほど経ち500件を超える適用を数えており極めて実用性の高いシステムであるが、錆が配管の内部に発生している場合は考慮せずに診断している。その影響を評価するために原子反応のシミュレーションコードであるEGS4を使い、錆のある場合についての測定を試みた。結果は実験レベルで85%以上の精度を示しており今後の実用化につなげることにした。

### § 1. はじめに

建築産業の中に占めるリニューアルの重要性は近年ますますその重要度をましている。建築業者にお

いてもリニューアルのためのツールを調べておくことは極めて有用である。

このような観点から、建物内の老朽化した配管を診断する目的に添い、建築のスペース・時間・揚重

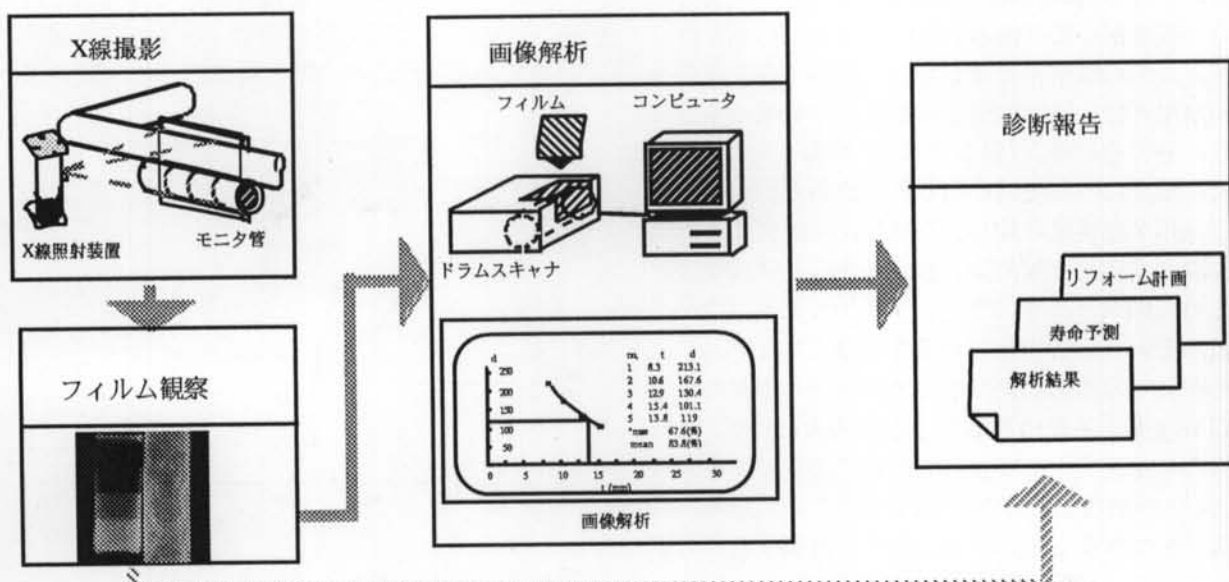


図-1 全体システムの構成

等の検査時の様々の制約に対応してX線による老朽度配管診断システムが、省スペース省力な建築用のシステムとして開発された。現在、開発されてから10年以上を経過して500件以上の配管診断の実績を得ている。開発時点でシステムのロジックを組む中では、管に発生する錆のあることを想定していないために、錆が発生して沈積し瘤を形成する場合には精度が変わってくる。従来この点を克服するのは論理的に不可能であった。しかしながら放射線のシミュレーションコードであるEGS4を用いることでその問題を克服する可能性が感じられ、この数年に亘り開発作業を続けてきた。1)、2)、3)、4) 最近ほぼ完遂の目処が得られたのでこの機会を利用して報告する。

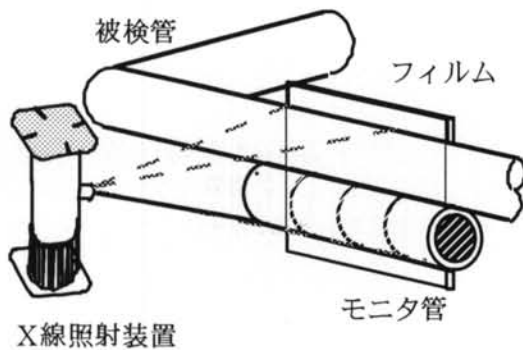


図-2 撮影姿態

## § 2. 従来システムの概要

### 2.1 構成

システムの構成は図-1に示すように、現場におけるX線撮影と撮影済みのX線フィルムの判定からフィルムの画像解析による厚みの取得～腐食量の算定～耐用年数の算出に至る解析とその結果の報告に大きく分けられる。(詳しくは5) 参照)

X線撮影は現場使用に適した出来るだけ小型軽量の工業用X線装置を使い、鮮明な像を撮影するためのX線管電圧と照射時間の選定、さらに精度を上げるための銅フィルタの選定、フィルムおよび増感氏の組み合わせ等の規定した条件に基づいて行う。これら機材は現場の制約の中で出来るだけ機動性に富む簡単な構造を求めた結果として決められた。また通常のX線を利用して良否を判定する非破壊検査とは違い、非破壊的に厚みを測定するために基準になる管(モニタ管と呼ぶ)を抱かせて撮影することを行っている。(図-2)

撮影したフィルムを現像した後に、目視観察で腐食の有無を調べる。腐食していない場合は異常が無いことを報告して終わる。腐食している場合には画像解析にかける。フィルムは、ドラムスキャナで読み取り、デジタル値に変換してコンピュータで処理する。その結果から耐用年数を算出して報告書を作成する。

### 2.2 ロジック

図-1の解析の部分のアウトプットについて図-3で説明する。モニタ管は厚みを4段階に分けて寸法を精確に作製した管である。各管サイズごとに作製してあり、水の入った管を撮影するときにはこの管にも水を入れて撮影するためにフタを設けてある。撮影するときにはX線管からフィルムまでの距離は一定値に決められており、現場でもできる限り精確に合わせる。幾何学的な距離を規定してあるので、撮影したフィルムを現像して、フィルム上の点を任意に選ぶとその点の位置からX線管の焦点までの距離と通過した鉄部の厚みが計算出来る。そこでフィルムの黒化度合(濃度)をスキャナで読み取り、このような点をフィルム上に4点取ることで、フィルムの濃度とX線の透過した鉄の厚みの関係を近似的に把握することができる。その関係が図-3の中央部の4点に跨がる右下がりの曲線であり、この線を利用して任意のフィルムの濃度から鉄の厚みを得ることができる。

このような関係をどのフィルムにおいても常に精確に得るために、現像条件により同じ鉄厚でも違う濃度になるフィルムの性向を防ぐために撮影する度にモニタ管を併設する。

水の入った管の場合には得られる厚みは、鉄の厚みと水の厚みの和になるので、もう一つの関係式が必要である。それは管状の構造では水と鉄の厚みの

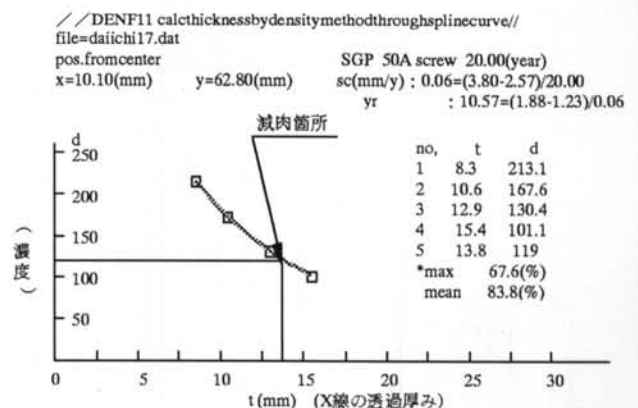


図-3 アウトプットの概要

和が管外径に等しいことから得られる。

以上のようにして厚みを測定する。この厚み測定結果を用いて元々の管厚から引くことで腐食された減厚みを求める。さらに減厚みを経年数で割ることで腐食速度を求める。残存している厚みをこの腐食速度で割ることで残存耐用年数を求められる。

以上が現状のシステムの主要なロジックである。

### 2.3 特徴

以上のように構成されたシステムは次のような特徴を持つ。

#### 1) アクセスが容易

配管はシャフト内や天井内或いは機械室内で並ぶなど最小限のメンテナンススペースしかない。これに対処するのにたかだか直径 10 数 cm、重量 20kg 弱の機器と厚さ 1 cm のフィルムカセットの組み合わせは場所を取らず容易に設置が出来る。

#### 2) 予備作業が少ない

配管の周囲は汚れや保温材、その外装材、塗装等が付着している場合が多いが本システムならば多少の汚れがあっても十分に撮が出来る。少なくとも表面を研磨するなどの作業が必要ない。

#### 3) 運搬が容易

検査機器が小型軽量でまた他の機材も小型であるので階段を歩行運搬したり、天井裏を移動することも出来る。

#### 4) 作業時間が短い

現場での撮影は一所 1 時間弱で行える。しかもその殆どは機器のセットの為の時間であり、撮影に要する時間は極めて短い。

#### 5) 診断結果がわかりやすい

フィルムによる結果は、一瞥しただけである程度の状態がわかる。さらに定量的な残存寿命何年という結果はわかりやすい。

#### 6) 安全である

労働安全衛生法の適用を受ける工業用 X 線照射装置は撮影意時の立ち入り禁止区域の設定、有資格者による管理区域の設定など安全のための規定が網羅されており安全性が高い。

以上の様な特徴を持つ X 線による老朽度配管診断システムであるが、管に発生する錆の厚みを考慮しようとするすると錆の厚みが一つ変数として増えるために式が一つ必要になる。これは今までの考え方では求められない。これを満たすために期待した関係がエネルギーの吸収に基づく関係である。

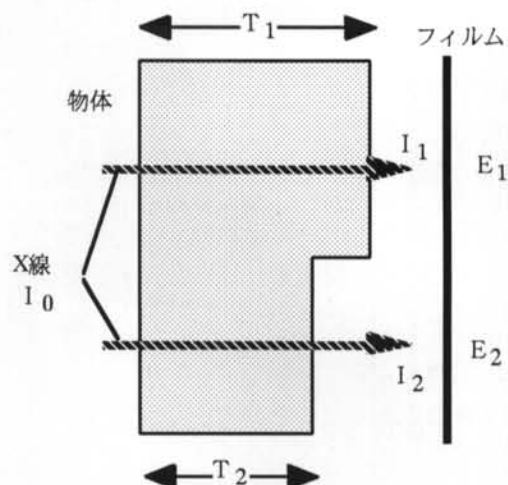


図-4 X線の透過と吸収

### § 3. X線エネルギーの吸収

X線が物体を透過するときにはX線は物体に一部吸収される。その関係を示したのが図-4である。強度の関係は式(1)に示す。ただしこの関係はX線が単一の波長の場合である。

$$I = I_0 \exp(-\mu T) \quad (1)$$

$\mu$  : 線吸収係数

$T$  : 物体の厚み

$I$  : 照射されたX線強度

$I_0$  : 透過する前のX線強度

実際はX線照射装置の発生スペクトルは分布の幅を持ち、単一スペクトルではないのでその吸収エネルギーもスペクトルの和になり単純に計算出来ない。そこで照射装置のエネルギースペクトルを求めることが必要になる。その時の吸収を式(2)に記す。

$$I = \int I_{0f} \exp(-\mu_f T) df \quad (2)$$

$\mu_f$  : 周波数による変化を考慮した $\mu$

$I_{0f}$  : 周波数による変化を考慮した $I_0$

一方、フィルム上の濃度と露出量の関係はその濃度変化が小さくて照射量が比例領域にあれば、以下の関係があることが知られている。

$$D_1 - D_2 = \gamma (\log E_1 - \log E_2) \quad (3)$$

D : フィルム濃度  
 $\gamma$  : 平均コントラスト  
 E : 露出

上式の示すところによれば、露出量がフィルムの電子の反応で表現出来れば、濃度の変化がそのまま EGS4 のシミュレーションで表現できることになる。

#### § 4 . EGS4 シミュレーションコード

##### 4 .1 概要

本コードの名称は Electron Gamm Shower の 4 番である。名前の意味するところは電子あるいはガンマ線の反応のシミュレーションコードであり、元々はスタンフォード大学で開発された。主ロジックはモンテカルロ法であり、その特徴は解析的に方程式を解くのではなく試行錯誤的に大量のサンプルを発生させてその傾向をみて、あるいは結果を得る方法にある。コンピューター上でこの方法を実現するために、実際には乱数を発生させて同じ関係を何度も繰り返して表現し、その期待値をとり収束させることで粒子反応を類推し、また結果としての数値を得る。

空間的な構造の表現の面でも角柱、円柱、円筒等様々のモデルを用意し、さらに粒子反応についても数多くのサブルーチンを備えて、あらゆる粒子に関してその吸収、反射、透過を計算出来るといわれている。またソースを広く一般に公開して普及に勤めるとともに積極的に使用者による改良を期待・奨励している。今までに活用された事例で多いのはやはり高エネルギーの原子反応であるが、近年は医学分野あるいは筆者のような低エネルギー分野にも利用が広がっている。

##### 4 .2 適用の効果

本システムへの適用は、システムの概要で触れたように連立方程式を解くのに際して不足する一つの式を作ることである。そこで、撮影の構成物全体についてエネルギーの吸収の観点からみて式が出来れば良い。この時の撮影の構成物は X 線照射装置から配管の鉄、鉛、水、フィルム等で構成される。これらに関してエネルギー吸収を式で表し、さらにそれについてフィルムの濃度との関係を利用することが期待される。

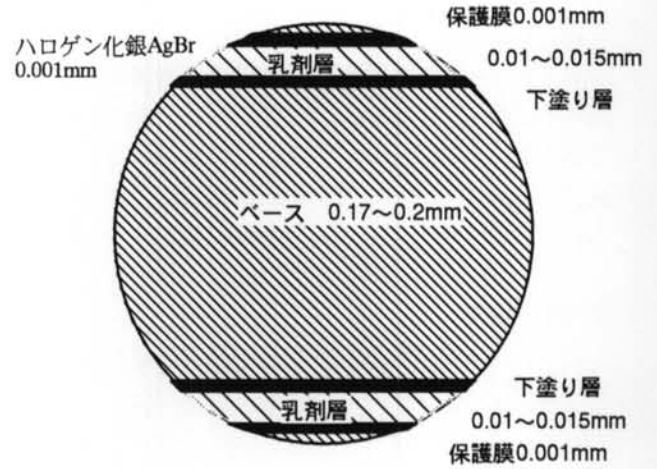


図-5 フィルムの構造

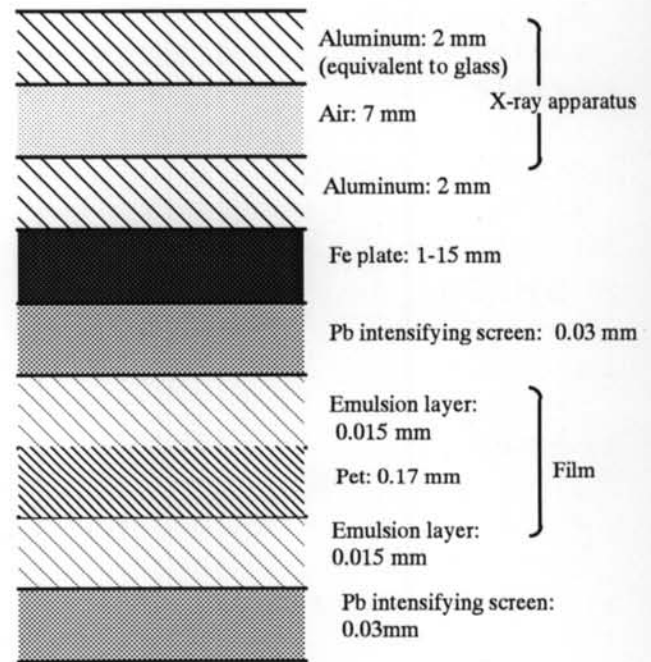


図-6 鉄板の撮影のモデル

#### § 5 . 鉛を含む鉄管の厚みの測定

##### 5 .1 フィルム

撮影系の構成要素のそれぞれの吸収エネルギーを求めるに当り、最終的に吸収がシミュレーションでできるかを判定するのはフィルムの吸収のシミュレーション結果と撮影結果の対比である。まず、フィルムの吸収エネルギーと濃度の関係を求めた。元々フィルムの感光反応は光を吸収した時の銀の反応であるが、そこに関与するのは電子であり、EGS4 でこの反応にかかるエネルギーの吸収は求められる。

ただし、フィルムの中の銀の感光反応は通常の銀の板ではなくエマルジョンの中に粒状にして溶かしているので実際の反応を何処まで表現できるかはわからない。フィルムのメーカー各社もエマルジョンを工夫して感度を上げているようである。これが実際に実験で確かめてみる所以である。

フィルムの構造は図-5に示すように基材の上に上下2層の銀を含むエマルジョンがある。そして感光反応はこのエマルジョンの層の中で吸収される電子に因り起きるとした。さらに実際のシミュレーション計算時のシミュレーションモデルの構成は図-6に示すように、増感紙を加えて出来るだけ正確に再現した。

### 5.2 X線照射装置

X線照射装置の中心すなわちX線を発生する発生部は図-7に示すよう簡単な真空管である。フィラメントに高電圧をかけて電子を発生し、ターゲット

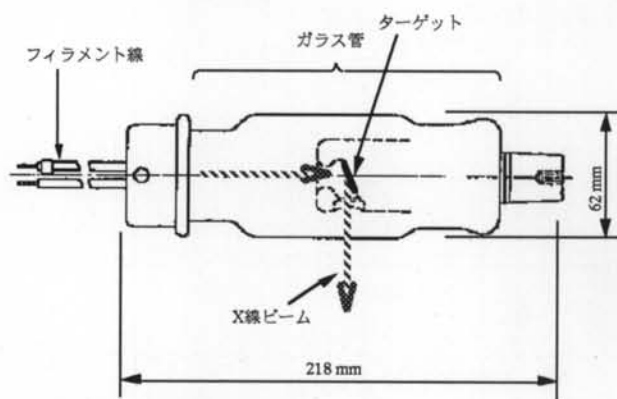


図-7 X線照射装置

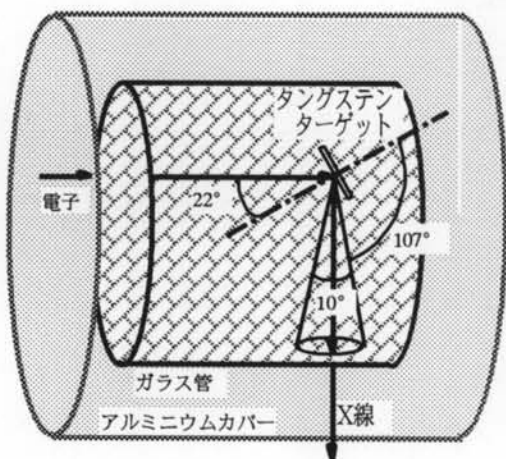


図-8 X線管のシミュレーションモデル

という金属（この場合にはタングステン）円盤に当てるとX線を発生する。シミュレーションの際には図-8に示す構造に簡略化した。電子を傾いたタングステン板に当てその発生するX線のスペクトルを図の円錐形状の照射口の範囲内で求めた。得られたスペクトルは図-9に示す。この分布をさらに周波数をとびとびに選んで各点エネルギーを表示することで近似して照射源とし、これをもう一度EGS4の内

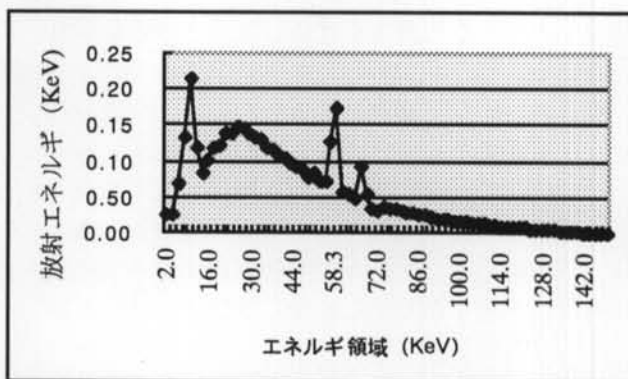


図-9 発生スペクトルのシミュレーション結果

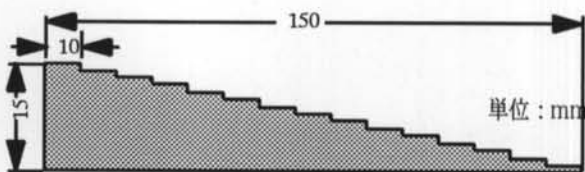


図-10 鉄製階調ブロックの断面

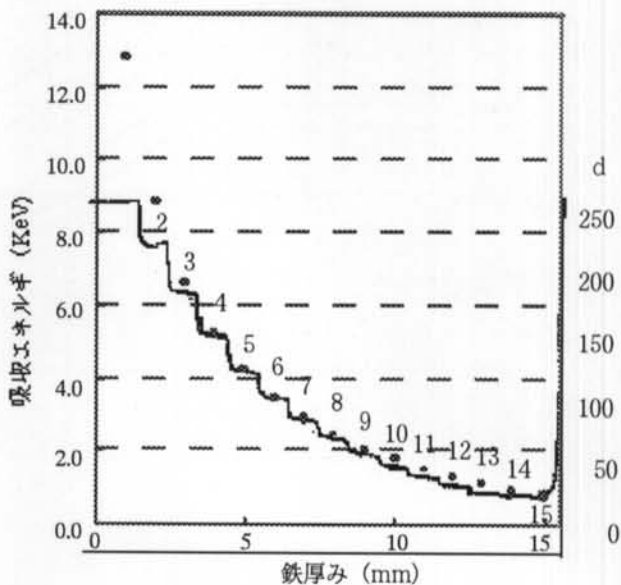


図-11 フィルムの濃度とエネルギー吸収シミュレーション結果

部で用いてX線照射装置による撮影のシミュレーションを行った。この時の被写体は鉄板であり、その厚みを変化してフィルムの吸収エネルギーを求めている。機材の配置は実際の撮影のとおりの寸法にしてある。

一方、実際の撮影は図-10のような鉄の階調ブロックを用いてフィルムに撮影し現像し、その濃度をスキャナで読み取った。このシミュレーションされた吸収エネルギーとスキャナにより読み取ったフィルムの黒化濃度を比較した。その結果が図-11である。階段状の斜線になっているのがフィルム濃度を表し、点で離散的に表したのがシミュレーションによるエネルギー吸収を表している。

図に示すように端部で特に薄いところでは合わないが総じて良く濃度とエネルギー吸収が一致している。これによりエネルギー吸収の関係を式に表せる可能性が高くなり次の作業に進むこととした。

### 5.3 錆管のシミュレーション

鋼管中に生ずる錆は殆どが酸化鉄であることが類

推される。その他に珪素などの化合物があると思われる。この組成はその生成する環境によりある程度変化することが考えられる。ここでは実際に腐食した配管を採取し、その中に生成した錆を取得し定量分析してその構成成分、比重等を求めた。分析の結果は表-1、2に示す。この分析結果を錆の代表として用い、鉄と組み合わせてさらに厚みを変化させてX線照射装置を用いて撮影した場合のフィルムのエネルギー吸収をシミュレーション出来る。ただし、

配管用途	比重	嵩比重
給水	2.08	0.97

表-1 錆の分析 (比重)

配管用途	O	Fe	Si	Na	C	S	Zn
給水	27.00	36.90	1.94	0.06	26.00	0.28	2.20

表-2 錆の成分分析

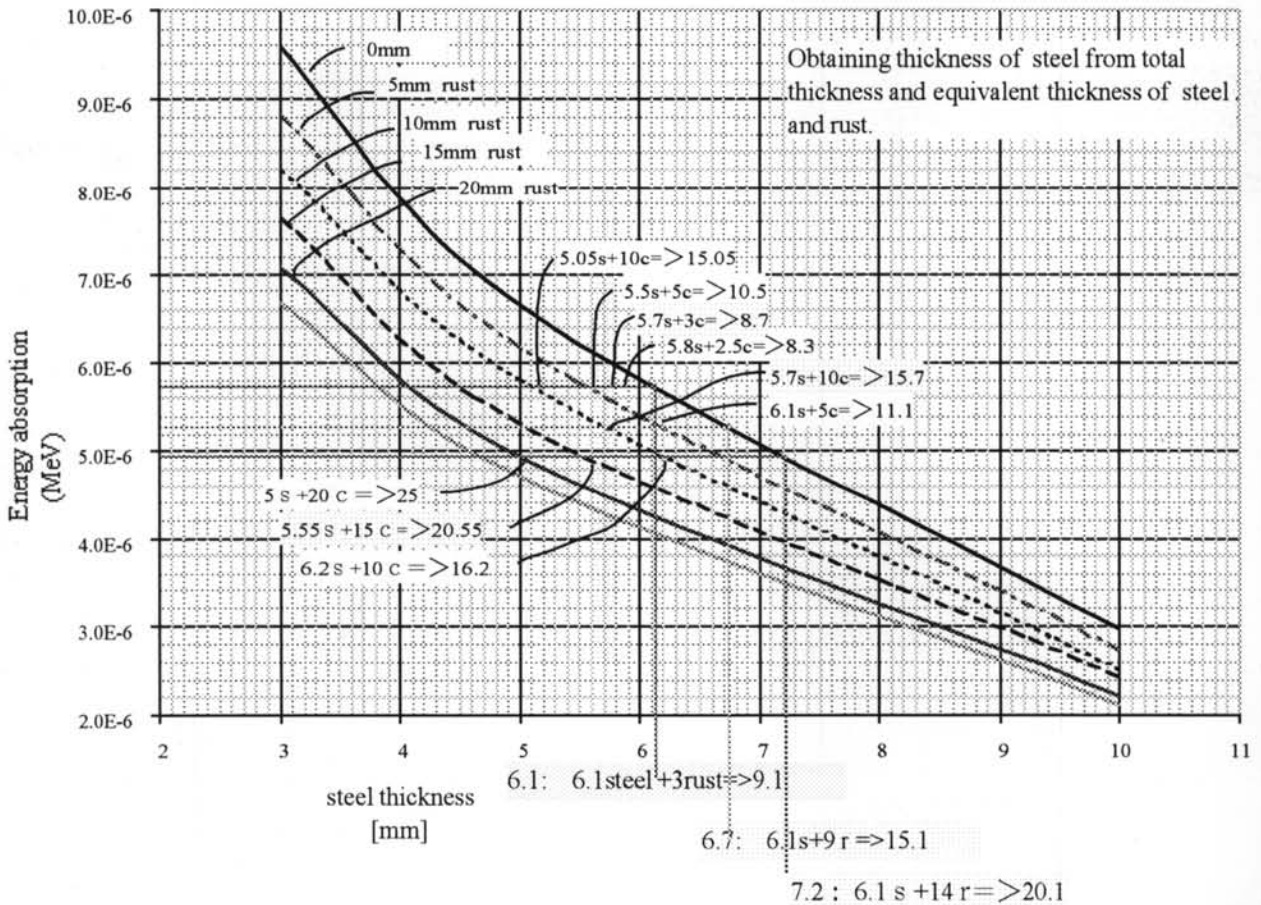


図-13 空の錆管の厚み測定

シミュレーションは時間がかかることもあり、ディスプレイに求めてその結果求めた点を近似曲線で結ぶことでエネルギー吸収曲線を得た。シミュレーションのモデルは図-12に示す。エネルギー吸収曲線を用いて厚みを求めるのが次の試行であり、その過程を図-13に沿って説明する。尚この時には図-

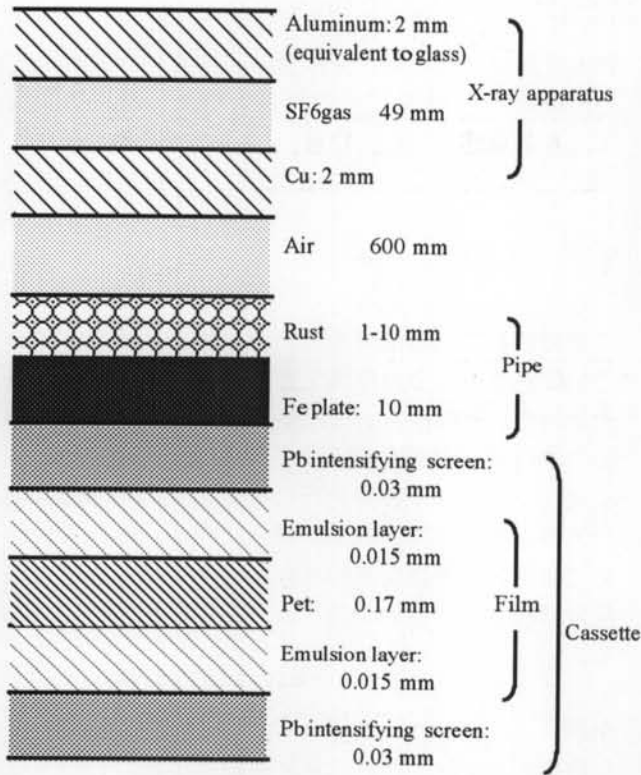


図-12 空管のシミュレーションモデル

14に示すような配置で実験撮影を行い、そのフィルムの濃度をスキャナで読み取り計算結果と照合した。

図-13は水の入っていない空の管の例である。横軸は鉄の等価的な厚み（水であれ鉄であれX線を通したときに吸収されるエネルギーが鉄の場合に相当する厚み）であり、斜めの曲線はその鉄にさらに錆が載った状態であるときの厚みを表している。各曲線は錆の厚みを5mm毎に変化させて求めたものであり、一番上の曲線は錆がないときのエネルギー吸収を表す曲線である。この曲線上の点から降ろした垂直線がX軸と交わる場所は鉄の厚みを表し、同じ点から水平に引いた線がy軸と交わる点はその時の吸収エネルギーを表す。水平線が各々の斜めの曲線と交わる点は同じエネルギー吸収を示す錆と鉄の組み合わせを表している。

この論理を錆の厚みの算出に使えば以下のように

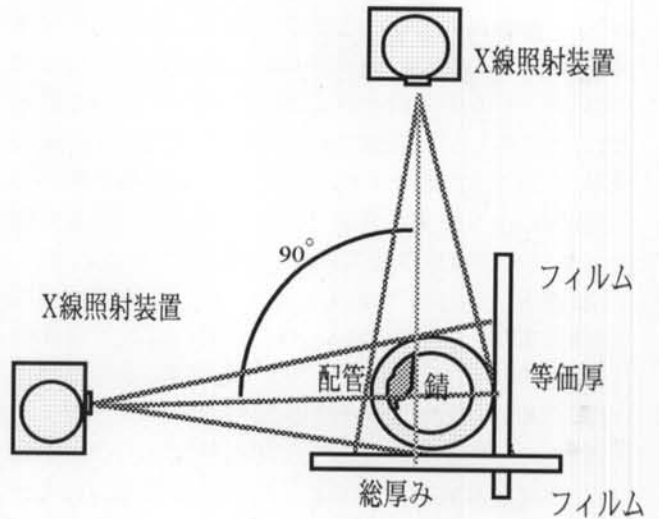


図-15 2方向からの撮影

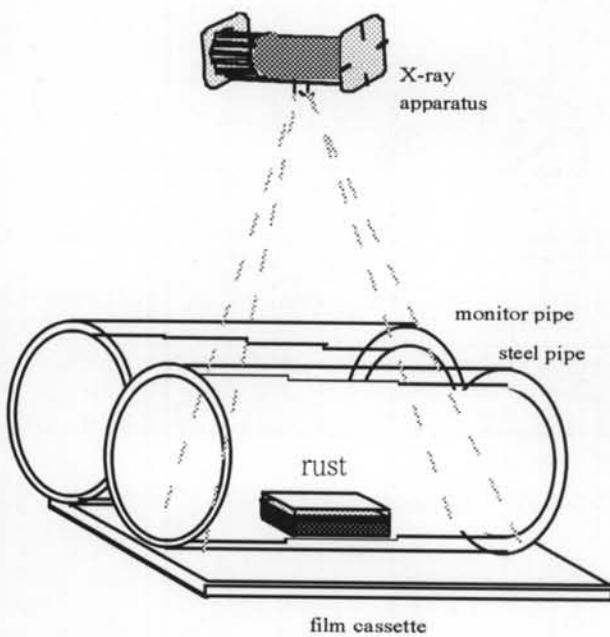


図-14 空の錆管の試験撮影

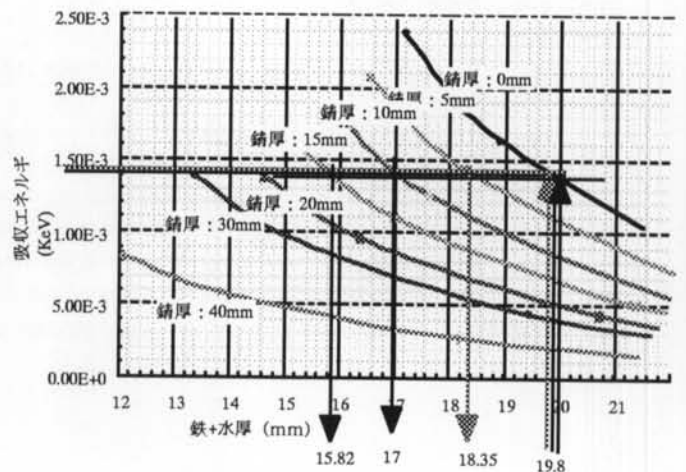


図-16 水入の錆管の厚み測定

No	鉄厚 (mm)	錆厚 (mm)	等価厚 (mm)	測定厚 (mm)	誤差 (mm)	誤差 (%)
1	6.1	3	6.1	5.8	0.3	5.2
2	6.1	9	6.7	5.85	0.25	4.3
3	6.1	14	7.2	5.7	0.4	7.0

表-3 空管の測定結果

No	鉄厚 (mm)	錆厚 (mm)	等価厚 (mm)	測定厚 (mm)	誤差 (mm)	誤差 (%)
1	6.1	5	19.8	5.50	0.60	11.0
2	6.1	10	19.9	5.58	0.52	9.3
3	6.1	15	20.1	5.51	0.59	10.8

表-4 水入管の測定結果

なる。まずある錆と鉄を含む混合物の鉄としての等価厚を求める。この値は従来のシステムでモニタ管との対比により求められる。その等価厚の厚みのx軸上の点を求めてここから垂直に線を立ち上げて錆が0の曲線にぶつけ、そこから水平に線を引き交差する各曲線の交点の意味する鉄と錆の組み合わせを求める。その中で錆と鉄の厚みの和が配管内の鉄と錆の和に等しい点を求めればその組み合わせが錆の厚みを表す。なおその時の錆と鉄の和は横方向からの撮影により輪郭を求めることで求める。つまり図-15に示すような2方向からの撮影である。

配管内に水のある場合にはさらに一つ不確定要因が増えるが、配管内で水と錆と鉄の和は配管外径長に等しいはずであり、結局空の管と同じような論理で求めることとした。その線図は図-16に示す。さらにこの過程をコンピュータで自動化することを試み、曲線を数式で近似させ、鉄と錆の厚みの和もシ

ミュレーションした点の間を内挿近似して求めることとした。

## § 6 . 結果の検証

空の管と水入りの管の錆と鉄のモデルを、シミュレーションした場合と実測により求めた場合で鉄の厚みを比較してみると空の管の方が良い一致を示したが両者とも85%以上の精度を得た。結果を表-3, 4に示す。

## § 7 . おわりに

現用されている配管の老朽度を診断するシステムで、錆のある場合の影響を考慮して診断を試みた。放射線のシミュレーションコードを用いてエネルギー吸収の観点から全構成部材を見直し、シミュレーション計算を行い結果として錆のある場合の厚み測定を85%以上の精度で得ることが実験的にできた。今後は引き続き現在手作業で行っている部分の自動化を行いシステム完成を目指す予定である。

## 謝辞

EGS4の使用について常に御指導いただいた文部省高エネルギー研究機構の平山教授に紙面を借りてお礼申し上げます。

## <参考文献>

- 1) G. Kajiwara, "Examination of the X-ray piping diagnostic system using EGS4", Proceedings of the Seventh Egs4 Users' Meeting in Japan, 1998, KEK Proceedings 98-7
- 2) G. Kajiwara, "Examination of the X-ray piping diagnostic system using EGS4 (In case Considering Spectrum of X-ray)", Proceedings of the Eighth Egs4 Users' Meeting in Japan, 1999, KEK Proceedings 99-15
- 3) G. Kajiwara, "Examination of the X-ray piping diagnostic system using EGS4 (Examination of the Film and Iron Rust)", Proceedings of the Second International Workshop on Egs4, 2000, KEK Proceedings 2000-20
- 4) G. Kajiwara, "Examination of the X-ray piping diagnostic system using EGS4 (Measuring the thickness of a Steel Pipe with Rust)", Proceedings of the Ninth Egs4 Users' Meeting in Japan, 2001, KEK Proceedings 2001-22
- 5) 梶原, "X線による配管老朽度診断システム", 第2回非破壊検査シンポジウム講演論文集, pp69-74, 1997