資 料

RI・放射線の産業利用*

Ⅱ. 産業各分野における RI 等利用例

1. 鉄鋼分野—— γ 線厚さ計を中心に——†

白川芳幸

福井大学工学部 910 福井市文京 3-9-1

Key Words : industrial usage, thickness gauge, radioactivity, gamma-ray, photoelectric absorption, Compton scattering, linear attenuation coefficient

1. はじめに

放射性同位元素 (RI) を装備した工業用計測機器は産業界に広く受け入れられ、生産管理、プロセス制御、製品検査、品質保証などに活用されている。その設置台数は1996年版の統計¹⁾によると7990台にもなっている。主要な機器としては厚さ計が2671台、レベル計が1337台、密度計が850台、水分計が143台である。これらの機器の中でも厚さ計が最も多く使用されている。特に鉄鋼分野で使用される厚さ計は使用方法が多用途で、かつ高度であり興味深い。ここでは、鉄鋼業における RI 利用機器のうち、 γ 線厚さ計の特徴、原理、構成、仕様、利用方法などを中心に解説する。

表1では統計をもとに産業分野における厚さ計の設置台数の推移を産業分野ごとに年代を

追って整理してみた。導入に熱心な産業は紙・パルプ、鉄鋼、化学、繊維分野であり、1996年にはこの4業種で厚さ計設置台数は2094台であり、産業界全体の台数の78%を占めている。 β 線厚さ計は紙・パルプ、化学、繊維業界を中

表1 産業分野別に見た β 線、および γ 線厚さ計の設置台数の年次変化

年 (3月末)	繊維	紙・パルプ	化学	鉄鋼	産業界の総 合計台数
1977	99	333	280	448	1384
1978	113	343	287	473	1427
1979	81	380	309	463	1464
1980	69	438	293	514	1535
1981	85	432	290	478	1778
1982	64	467	284	507	1577
1983	119	444	253	487	1845
1984	120	542	253	483	1953
1985	115	542	249	471	1937
1986	128	586	268	535	2070
1987	135	636	274	568	2104
1988	142	649	300	625	2210
1989	146	696	295	639	2292
1990	166	757	349	627	2478
1991	180	796	382	646	2565
1992	187	815	384	651	2580
1993	214	806	382	655	2607
1994	213	839	384	632	2624
1995	250	857	365	633	2677
1996	235	882	344	633	2671

† Industrial Uses of Radioisotopes and Radiation. II. Applications of Radioactivity etc. in Various Industries. 1. Aspects in the Steel Industry Laying Stress on γ -Ray Thickness Gauges. Yoshiyuki SHIRAKAWA : Faculty of Engineering, Fukui University, 3-9-1, Bunkyo, Fukui-shi 910, Japan.

* 本報告は、日本アイソトープ協会理工学部会「放射性同位体等の産業利用専門委員会」(委員長; 小佐古敏荘(東大・原総センター))によって検討されたものである。

心に導入され、 γ 線厚さ計は主として鉄鋼分野に設置されている。1977年と1996年の厚さ計の設置台数を比較すると、紙・パルプでは2.7倍、鉄鋼では1.4倍、化学では1.2倍、繊維では2.4倍の増加になっている。これは、「紙・パルプ、繊維分野はここ20年の間にもともとなかった所を中心に新設が相次いだ。」こと、および「鉄鋼、化学分野では20年前にすでに相当数が設置されていて、その台数の変化を伴わないリプレースがこの間に行われ、同時に新たな用途、ラインに対して新設されてきた。」と解釈できる。この統計では現れていないが、鉄鋼分野ではX線厚さ計が200～300台程度使用され、プロセス制御（圧延機の制御）に重要な役割を担っている。つまり γ 線およびX線厚さ計を合計すると鉄鋼が最大のユーザーである。

2. γ 線厚さ計について

2.1 γ 線厚さ計の概要と特徴

^{241}Am 、 ^{137}Cs などのRIから放出される γ 線をコリメートして鋼板に照射すると、鋼板の厚さに応じた減衰が生じ、透過してくる γ 線の量に変化する。この厚さと透過 γ 線の減衰を関係づけて、透過 γ 線の量を計数し、厚さを求める装置が γ 線厚さ計である。

^{241}Am の γ 線のエネルギーは60 keVと低く、単位厚さに対する減衰量が多い。したがって1～10 mmの鋼板の厚さ測定に適している。一方、 ^{137}Cs の γ 線エネルギーは662 keVと比較的高いので10～100 mmの厚い鋼板の測定にふさわしい。鉄鋼分野で使われる際、多くの場合、線源の強さは ^{241}Am の場合で31.7～158.5 GBq程度であり、 ^{137}Cs で158.5 GBq～1.585 TBq程度である。測定が完了するまでの時間は通常50 ms以上であるので、鋼板を熱いまま薄く延ばす熱延ライン、および常温で圧延する冷延ラインなどの高速ラインでは γ 線厚さ計は使用されない。これらのラインでは線源強度が強い理由により応答時間が10 ms程度のX

線厚さ計が用いられる。一方、その他の中低速ライン（厚板ライン、切り板ライン、検査ラインなど）では γ 線厚さ計が主流である。

2.2 γ 線厚さ計の原理

γ 線と物質との主要な相互作用としては光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成があるが、厚さ計に装備される ^{241}Am 、 ^{137}Cs などのRIでは1.02 MeV以上のエネルギーが必要な電子対生成は生じない。これらの相互作用による減衰は線減衰係数 μ (cm^{-1})で表される。ここで具体例を考えてみる。物質を鉄とすると原子番号は26、密度は7.86 g/cm^3 、 ^{241}Am の γ 線エネルギーは60 keVである。この場合は光電吸収が優勢でコンプトン散乱の8倍程度の減衰係数である。両者を合計した線減衰係数は9.274 (cm^{-1})である^{2),3)}。また ^{137}Cs の場合、エネルギーは662 keVと比較的大きく光電吸収は相対的に無視でき、主としてコンプトン散乱が生じ、線減衰係数は0.581 (cm^{-1})となる^{2),3)}。

つぎに、この係数を用いた厚さの測定原理について述べる。入射する γ 線の数 I_0 、光電吸収される γ 線数を I_p 、散乱される γ 線数を I_s 、その他の効果で除去される γ 線数を I_c 、そして透過してくる γ 線数を I とすると、

図1 γ 線厚さ計の測定原理の模式図

$$I_0 = I_p + I_s + I_c + I \quad (1)$$

である。したがって、

$$I = I_0 - (I_p + I_s + I_c) \quad (2)$$

となる。この関係を図1に示す。ここで厚さを x とすると、線減衰係数の定義から、

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3)$$

となる⁴⁾。すると、

$$I_p + I_s + I_c = I_0 (1 - e^{-\mu x}) \quad (4)$$

が得られる。以上の式(1)-(4)が各 γ 線の数量関係を示している。これらの式で厚さ測定に必要なのは式(3)で、これを解くと、

$$x = \frac{1}{\mu} (\ln I_0 - \ln I) \quad (5)$$

となる。ここで I_0 , μ は既知であるので計数値(透過強度 I) が与えられれば x を計算できる。以上が測定原理である。

実際には直接式(5)を利用する必要はなく、測定目標値の範囲をカバーする何枚かの厚さの異なる基準板を用意し、計数値と厚さの検量線を目標値の近傍で線形近似した形で事前に作成し、用いるのが一般的である。この手法を以下に説明する。基準板の厚さを x , そのときの透過 γ 線の計数値を I とすると式(3)が成立する。つぎに実際の鋼板を測定したとき、計数値が ΔI 変化したとする。その原因は厚さの変化 Δx であるので、この関係式は、

$$I + \Delta I = I_0 e^{-\mu(x + \Delta x)} \quad (6)$$

となる。式(3)を式(6)に代入して整理し、線形近似すると、

$$I + \Delta I - I e^{-\mu \Delta x} \approx I(1 - \mu \Delta x) \quad (7)$$

が得られる。 Δx について整理すると、

$$\Delta x = -\frac{\Delta I}{\mu I} \quad (8)$$

となる。 I は基準板を用いたときの値で既知であり、 ΔI は計数値と I との差であり、計数終了時点で与えられる。したがって、求めたい鋼板の厚さは $x + \Delta x$ となる。

この方法の優れた点は、板厚が増大するにつれて複数の散乱を経験した γ 線が検出器に入る

ビルドアップ効果を加味できることである。すなわち、基準板を用いて検量線を作成する際に、基準厚さにおける計数検量線の接線の傾きから実効的な線減衰係数が計算でき、測定の際はこの値が利用されている。基準板の数だけ線形近似された線減衰係数が得られ、この数が多いほど測定精度は向上する。しかし、実際に多数の基準板の精度を維持するには労力が必要で、本方法の欠点でもあるが、最近、10点ほどの基準板を用いてビルドアップ効果を含む非線形モデルを先に考え、以降は基準板の枚数を2枚程度に減らしても十分に精度が維持できる方法が開発され実用化に至った⁵⁾。

これ以外にも鋼板に含まれる元素の種類(成分)、測定時の温度(密度が変化する)が実際には線減衰係数を変動させる。測定精度を要する場合には、製造する鋼板の種類や目標厚さが変わる度に、変動の影響を検討した膨大なデータがプロセスコンピュータから呼び出されモデルの中の係数を修正している場合もある⁶⁾。

2.3 γ 線厚さ計の構成と仕様

γ 線厚さ計の基本構成を図2に示す。線源は貯蔵を兼ねる線源容器に格納されている。測定時には回転式のシャッターが開き、コリメートされた γ 線ビームが照射される。高級機種では基準の校正板を有する自動校正装置がコリメータの前に設置されている。この線源容器は、その形状からCフレームと呼ばれる台車の下側に内蔵される。上側には検出器が置かれる。鋼板は線源容器と検出器の間を多数のローラーで搬送される。この配置は鋼板が線源容器に衝突することを避けるためにとられている。つまり、搬送用ローラーの上を行き来する鋼板が何らかの理由で蛇行しても反り上がっても、線源容器に当たることを避ける安全上の処置である。

検出器に関して、エネルギーの低い ^{241}Am 厚さ計では電離箱が使用される。また、エネルギーの比較的高い ^{137}Cs 厚さ計では圧力を高め

た電離箱,あるいはプラスチックシンチレータと光電子増倍管を組み合わせたシンチレーション検出器が利用されている。Cフレームの上面には厚さ計の使用状態を示す表示ランプがつけられる。赤色は使用中,すなわちシャッターが開,緑色は待機中,すなわちシャッターが閉であることを意味する。Cフレームには電動機が備えられ,レールの上の車輪を回転させることにより,ラインへの厚さ計の出し入れが可能となっている。管理区域の外側でかつ厚さ計がよく見える位置に台車操作盤が据え付けられる。また,厚さ計本体の測定機能や操作機能をもつ

図2 γ 線厚さ計の基本構成

制御盤は,環境が許せば台車操作盤の近くに設置される。高温,粉塵,蒸気,振動などで環境が悪い場合には直近の計器室,電気室などに設置される。制御盤からの測定データはプロセスコンピュータに伝送されプロセス制御モデルを用いてリアルタイムの計算処理がなされる。また管理台帳の自動作成も行われる。プロセスコンピュータからはつぎの鋼板の諸仕様,測定条件が制御盤内のコンピュータに伝送され,測定時間,成分補正係数,温度補正係数などが指示される。以上が基本的な厚さ計の構成である。

例として ^{241}Am 厚さ計の実物の写真⁷⁾を示す(図3)。これは後述する厚さ計とは別の管理用,検査・保証用の厚さ計である。

厚さ計はすべて注文生産であり,ユーザーの要望による各種のオプションが豊富である。そのため仕様・性能,および費用は多様であるが,ここでは標準的な厚さ計について代表的な数値^{7)~9)}を表2にまとめた。

図3 ^{241}Am を用いた厚さ計

表2 標準的な厚さ計の主な仕様,性能および価格

項目	^{241}Am を用いた厚さ計	^{137}Cs を用いた厚さ計
用途	薄板の管理・検査・保証	厚板の圧延制御, 厚板の管理・検査・保証
測定範囲	0 - 8 mm	5 - 100 mm
線源の強さ	11 - 185 GBq	370 GBq - 1.11 TBq
検出器	電離箱	プラスチックシンチレータ, 電離箱
設定精度 S	$\pm(\text{設定厚さの } 0.05\% + 1\mu\text{m})$	$\pm(\text{設定厚さの } 0.05\% + 10\mu\text{m})$
ドリフト D	$\pm(\text{設定厚さの } 0.05\% + 2\mu\text{m})/24\text{ h}$	$\pm(\text{設定厚さの } 0.04\% + 10\mu\text{m})/10\text{ min}$
統計ノイズ N	$\pm 1.8\mu\text{m at } 2\text{ mm}$ $\pm 17\mu\text{m at } 7\text{ mm}$	$\pm 15\mu\text{m at } 20\text{ mm}$ $\pm 65\mu\text{m at } 70\text{ mm}$
総合精度	$\pm(S^2 + D^2 + N^2)^{1/2}$	$\pm(S^2 + D^2 + N^2)^{1/2}$
応答速度	50 ms	100 ms
価格	10 - 35 百万円 (工事費除く)	50 - 250 百万円 (工事費除く)

2・4 導入、使用にあたっての留意点

γ線厚さ計の導入の際の許可申請については以下になる。関係する法令は「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（放射線障害防止法）、同法律施行例（政令）、同法律施行規則（総理府令）」、「放射線を放出する同位元素の数量を定める件（科学技術庁告示）」などである。また「労働安全衛生法」の体系に属する労働省令の「電離放射線障害防止規則」も関係する。まず、事業所に初めて放射性同位元素を有する機器（この場合γ線厚さ計）を導入する場合には放射線障害防止法3条、「同法律施行令3条」による「使用の許可」が必要である。科学技術庁放射線安全課に事前に相談に出向き指導を受け、その後に申請書を提出する。すでに「使用の許可」を受けている事業所にγ線厚さ計を設置する場合には「法10-2、法11-2、11-2-2」、「令7、9、10」に関係した「許可使用に係る変更の許可申請」が必要である。申請は前述と同様である。最近では許可が下りるまでの時間が短縮されてきているが、少なくとも3か月以上前までに申請書を提出するよう心がけたほうがよい。「電離放射線障害防止規則」ではあらかじめ（1か月くらい前）、労働基準監督署に「使用の届出」をしなければならない。以上の法令、手続き関係については日本アイソトープ協会から出版されている「アイソトープ法令集Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ」を参考にするといよい。

つぎに、安全面についての留意点を述べる。放射線業務従事者に対する安全の観点では、厚さ計の線源は密封線源であり、かつ貯蔵容器を兼ねる線源容器に入っているため線源そのものの取扱いは容易である。そこで、安全を別の観点、すなわちラインの操業員、整備員に対する安全の面から考えてみると、γ線厚さ計の設置に関しては管理区域の設定が重要であることがわかる。管理区域の境界では1cm線量当量が1週間につき300μSvを超えてはならない。安全上は広く設定したほうがよいが、厚さ計以外

のラインの機器が取り込まれてしまうと整備が面倒になる。整備員が頻繁に管理区域に入る場合には「放射線業務従事者」に指定しなければならない。したがって、周辺の機器の状況を考慮して整備関係者と十分打ち合わせた上で管理区域境界を決定する必要がある。

最近、海外の放射線機器メーカーからの輸入が増加傾向にある。国内メーカーの場合には、メーカーが国内法に詳しく経験も豊かであるのでユーザーの側で心配することはないが、海外メーカーから購入する場合には、一般に線源を装備しない状態で輸入され、ユーザーの事業所で線源を組み込むか、あるいは販売の業の許可をもつ輸入代理店で組み込んだ後にユーザーに納品される場合が多い。海外メーカーの製品を導入する場合にはユーザー、メーカー、輸入代理店で十分に打ち合わせをする必要がある。装置の図面、漏洩線量分布図などは管理区域の設定の他、各種申請に必要であるので、これらの情報はゆとりをもって取り寄せるべきである。

2・5 γ線厚さ計の使用実施例

厚さ計の使用方法を大別すると管理、検査・保証、制御となる。

2・5・1 管理

出荷品に加工される前の半製品の厚さを管理するものである。たとえば鋼板を曲げて製造する鋼管の工程において加工前に厚さを測定し、規格を外れたものは切断してスクラップにするか、そのまま加工してグレードの低い製品として出荷するかなどの判断をおこなう。また規格外れの状況を上流工程に伝えて発生原因の解明に当たることもある。

2・5・2 検査・保証

出荷品の最終検査を行い、ユーザーの要望どおりの厚さ範囲を満足しているか否かを調べる。規格外れの場合にはスクラップにするか、不良部分を除いた重量（長さではなく重量で注文がくる場合が多い）が注文の範囲に入るような措置をとる。そして最後にミルシート（仕様

書および保証書)にデータが記入され品質が保証される。ISO (International Organization for Standardization, 日本語名称は国際標準化機構) の 9000 シリーズに合格するために検査・保証用の厚さ計自体の管理がますます重要になってきている。

2・5・3 制御

高機能の厚さ計が導入され高度な制御に使われているのが圧延工程である。圧延制御技術は圧延製造プロセス、圧延機、駆動装置、自動化技術、計測機器などの発展とともに進歩している。その制御の種類は最も重要な板厚制御、板幅制御、張力制御、クラウン(鋼板の幅方向の中央部が両端より膨らんでいる状態)・平坦度制御である。特筆すべきは、より高度な板厚制御のために連続したタンデム圧延機内部に設置される中間板厚計が開発・実用化されたこと、クラウン制御のために専用の厚さ計(クラウンメータ)が開発・実用化¹⁰⁾されたことである。すなわち圧延制御技術の高度化が新しい厚さ計を生み出す原動力になったことは注目に値する。

これらの仕組みの理解には高度な制御理論の知識が必要であるが、ここでは比較的理解しや

図4 γ線厚さ計による板圧制御システムの構成例

すい厚板の仕上げ圧延機の制御の概要について紹介する。

厚板ラインの圧延工程は粗圧延機と仕上げ圧延機で構成されている。そして圧延機の前面から後面へ、後面から前面へ繰り返し圧延し目標の板厚を作り込む。仕上げ圧延機は図4に示すようにプロセスコンピュータ、AGC (automatic gauge control) コントローラ、油圧圧下装置、γ線厚さ計で構成される。厚さ計は仕上げ圧延機後面から2-3mの位置に設置される。10m以上も後方にある従来の厚さ計に対して、直近γ線厚さ計と呼ばれている。

前面から後面へ圧延する正転時にはFAST AGCとモニタリングAGCを、後面から前面へ圧延する逆転時にはフィードフォワードAGCを使用する高度な制御が実現されている⁶⁾。

図5に示すモニタリングAGCは鋼板全長の狙い板厚(目標値)の精度向上を目的として、圧延後の板厚と目標値の差をフィードバックしてロールの圧下制御を行うものである。

従来の厚さ計に対して圧延機後面の直近に厚さ計があるので遅れ時間は少なくなったが、それでも0.4-0.8s後に初めて厚さが測定される。この問題解決のためにモデル精度、むだ時間予測精度を向上させスミスのむだ時間補償法をベースとした制御法が開発されている⁶⁾。

図6はフィードフォワードAGCの制御構成

図5 モニタリングAGCの例

図6 フィードフォワード AGC の例

である。この AGC によって逆転時に後面で測定された板厚の偏差を鋼板の進行に合わせてトラッキングしロールの圧下位置が制御される。

3. 鉄鋼分野における利用普及への提言

γ 線厚さ計は制御用の検出端としても、管理、検査・保証用の検出端としても相性がよく、使用すればすぐに成果があがる。今後とも台数は漸増していくと考えられる。そして、その効果がまだ使用されていない事業所でも認められれば台数の急増の可能性も秘めている。このためには徹底的に標準化・規格化してコストダウンすることが必要である。コスト面からは、ユーザーにおいては仕様の追加や変更を煩雑におこなわないことである。特に管理、検査・保証用の厚さ計では標準品でも十分に成果を上げることは可能である。

制御に用いる場合は多少様相が異なる。複数の線源と複数の検出器を装備した鋼板の形状計や鋼管の肉厚計¹¹⁾などが特別に設計され実用に供されている。これらは高度な制御技術と融合して生産工程の歩留まり向上、品質の安定化・厳格化（すべてコストに反映される）などに貢献している。すなわち制御に用いられる場合には、制御を中心に据え、それに適するように厚さ計が開発、改良されるのが最近の傾向で

ある。一般的にメーカーとユーザーの共同研究が多く、新技術出現の原動力ともなっている。今後とも積極的な推進が期待される。そして他企業、他産業分野においても適用できるよう、技術の発表、公開、外部向け販売が促進されることを望む。

4. おわりに

鉄鋼分野の放射線利用機器の代表ともいえる厚さ計、特に鉄鋼分野の γ 線厚さ計について述べてきたが、同分野でもレベル計、密度計、水分計、非破壊検査装置などが盛んに導入されている。事業所の新設、ラインの改造、装置の更新の際に、これらの放射線機器の利用を検討し、最適機種を選択され、より大きなメリットを享受していただきたい。

文 献

- 1) 科学技術庁原子力安全局編：“放射線利用統計 1996”，pp. 6-21，日本アイソトープ協会，東京（1996）
- 2) 村上悠紀夫編：“放射線データブック”，pp. 62-64，154-156，334，地人書館，東京（1982）
- 3) 日本アイソトープ協会編：“アイソトープ便覧”，pp. 35-43，丸善，東京（1984）
- 4) Knoll, G. F.: “Radiation Detection and Measurement”，pp. 68-71，John Wiley and Sons，New York（1979）
- 5) IMS カタログ：Thickness Gauges — Signal Flow, Signal Tracking and Signal Check.
- 6) 平田 豊，鈴木和裕，和田汎平，上田一郎，星俊弘：鹿島厚板仕上げミル直近 γ 線厚み計による寸法精度向上，住友金属，**147**，(1)，117-121（1995）
- 7) 東芝カタログ：TOSGAGE-161C
- 8) 東芝カタログ：TOSGAGE-141
- 9) 放射線計測利用専門委員会編：“放射線応用計測器利用ガイド 改訂版”，pp. 26-27，中部原子力懇談会，名古屋（1992）
- 10) 安部可治，深沢千秋：薄板圧延寸法精度向上における計測制御技術，鉄と鋼，**79**，(3)，62-69（1992）
- 11) 奥村 精，紺屋範雄，岡 弘，粕屋利昭：小径シームレス熱間肉厚計の開発，川崎製鉄技報，**22**，(4)，266-270（1990）