

り、相対的平行度も実験的に 1/1000 rad の傾きで零点移動が 0.02 mm 程度になる点を確認した。

(3) 直流増巾器のドリフト

増巾器は前置増巾器の初段のエレクトロメータチューブを除き他は固体素子を用いて回路を組み、かつ主増巾器は気温 20°C に制御されている室内に設置した。直流増巾器そのものは最近の技術の進歩によつて、以前のように 8 hr に一回の零点調整を必要とするようなことは無く、工業的にも安定したものが得られている。

以上のように零ドリフトの解消に努力した結果、零ドリフトは全く調整を行わずに 48 hr に対して ±0.02 mm 以下、24 hr に対しては ±0.01 mm 以下ときわめて安定した状態にすることができた。

3.2 校正曲線

γ線厚さ計は単位面積当たりの重量で測定されるために熱間時に測定を行なつて、これにより冷間時の厚さを表示するためには、温度の補正を行なわなければならない。鋼板の温度が一定であれば鋼板の密度の温度係数で単純に補正を行えばよい。しかし厚板圧延機のように製品の板厚が大巾に変る場合には、その仕上り温度も相当に変化する。鉄の膨張係数から算出した補正係数は 100 deg 当り約 0.3% となるが、一定の温度として補正したのでは、温度差は ±200 deg にも達し無視できない誤差を生ずる。一方板の温度は圧延される板厚に対して、圧延作業上から決定されるある関係を有するので、この関係を用いて測定厚さに応じた温度補正を行えば、その差は小さくすることができる。

したがつて校正曲線は補正係数を決めた標準試料板によつて決定されたものを、実際作業とつき合せて修正して確定させなければならない。

このようにして校正した後の記録の一例を Fig. 3 に示す。

4. 結 言

以上述べたように厚板圧延機に γ線厚さ計を設置し、工業計器として使用可能の前提となる安定性について、種々検討し試験を行なつた結果、零ドリフトについては、自動修正装置を用いることなく 24 hr で ±0.01 mm 以下とすることができた。また校正曲線についても板厚と板の温度の関係を使い、その影響を測定厚さの ±0.3% 以下とすることができた。

この結果この厚さ計は十分実用に耐えることが確認され、設定値、偏差値の表示、記録方法なども使用しやすい方法を採用して、現在圧延作業に有効に使用され効果をあげている。

文 献

- 1) 日本放射線同位元素協会編：アイソトープ便覧
- 2) 三輪：応用放射線計測
- 3) 片桐、山崎：計測自動制御学会論文集 1 (1965) 1, p. 75

(196) プレス加工のスプリングバック
におよぼす r 値の影響

富士製鉄，中央研究所 ○青木 至
Effect of r-value on the Springback of
Press-Formed Parts.

Itaru AOKI.

1. 緒 言

プレス成形加工では材料が破断せずに、目的とする所定の形状を得ることが第1に要求される条件であり、これまでこの点については、深絞り性や張出し性と材料の引張り試験諸特性との関連において、多くの研究者によりかなり理論と実験との対応がつけられてきている。しかしながら、最近、プレス製品の形状が大型化し複雑化するとともに、その寸法精度の要求が厳しくなり、プレス加工した後の形状が問題にされるようになってきた。この製品精度にもつとも大きな影響を与える因子として、プレス加工後のスプリングバックをあげることができる。プレス成形技術上この問題を解決する手段は種々あるが、材料特性の方からは型になじみやすい材料、すなわち形状性の良い材料の開発が望まれてきた。

この形状性のうち、とくにスプリングバックをとりあげ、それにおよぼす材料特性の影響について、すでに種々の研究^{2)~7)}が行なわれている。われわれはより実際の加工に近いと思われる二軸方向の曲げについて、スプリングバックに与える材料諸特性の影響を理論的に検討し、とくに材料の異方性 (r 値) がどのようにスプリングバックに効果を与えるかを明らかにしたので報告する。

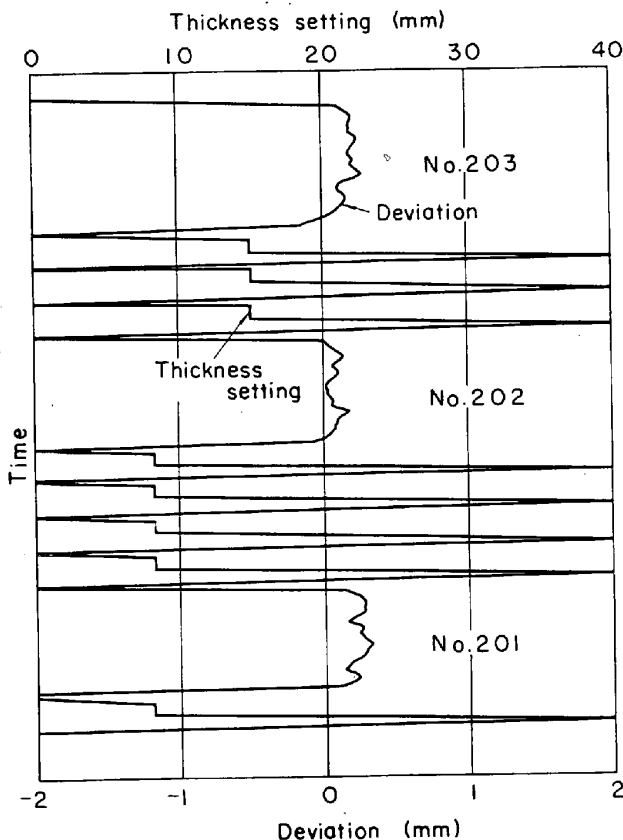


Fig. 3. Record of γ-ray thickness gauge.

2. 基礎となる方程式

2.1 つりあいの式

一様な板厚 t の薄板を考えて、板厚の中央が形成する面内に x 軸と y 軸を、それに垂直方向に z 軸をとる。いま曲げモーメント M_x と M_y を加えて、板は一様に曲げられた状態を考える。板の横断面は曲げ変形中平面を保ち、板厚方向の繊維に直交し、また板の広がりにくらべて、板厚は十分に小さいものとする。また xz 面, yz 面にある曲率半径を ρ_x, ρ_y とする。Fig.1 を参照にして、中立面から η の距離にある微小要素をとり、それに作用する板面方向の応力のつりあいを考え、高次の微小量を無視して整理すると、 z 軸方向のつりあいの式は

$$\frac{d\sigma_z}{d\eta} = \frac{\sigma_x}{\rho_x + \eta} + \frac{\sigma_y}{\rho_y + \eta} - \left(\frac{1}{\rho_x + \eta} + \frac{1}{\rho_y + \eta} \right) \sigma_z \dots\dots\dots (1)$$

と書きあらわせる。一方、 x, y, z 方向のひずみを $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ は非圧縮性の条件を使い、板厚が曲率半径に比べて十分に小さいものと考え、板の引張り側を正として

$$\epsilon_x = \frac{\eta}{\rho_x}, \epsilon_y = \frac{\eta}{\rho_y}, \epsilon_z = - \left(\frac{1}{\rho_x} + \frac{1}{\rho_y} \right) \eta \dots\dots\dots (2)$$

の関係が成立するものとする。

2.2 応力とひずみの関係式

異方性を考慮に入れた応力-ひずみ関係式⁸⁾⁹⁾ で、変形中に主応力と主ひずみの方向が一致し、しかも異方性パラメータがほとんど変化しない条件を用いると、応力とひずみの間の関係を与える式として

$$\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{(2H+G)\sigma_x - (F+2H)\sigma_y - (G-F)\sigma_z} = \frac{\epsilon_y - \epsilon_z}{(2F+H)\sigma_y - (G+2F)\sigma_z - (H-G)\sigma_x} \dots\dots\dots (3)$$

が得られる。ここで、 F, G, H は異方性パラメータをあらわす。(3)式に(2)式を代入して整理すると

$$\sigma_y = \beta_1 \sigma_x + \beta_2 \sigma_z \dots\dots\dots (4)$$

が得られる。ただし

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \frac{(2H+G) + (H-G)\alpha_1}{(F+2H) + (H+2F)\alpha_1} \\ \beta_2 &= \frac{(F-G) + (G+2F)\alpha_1}{(F+2H) + (H+2F)\alpha_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$\alpha_1 = \frac{1/\rho_x - 1/\rho_y}{1/\rho_x - 2/\rho_y} \dots\dots\dots (6)$$

である。ここで、 β_1 と β_2 の間には

$$\beta_1 + \beta_2 = 1 \dots\dots\dots (7)$$

の関係がある。

さて、異方性材料の相当応力 $\bar{\sigma}$ と相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}$ は次のように定義される。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \left\{ \frac{F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2}{F+G+H} \right\}^{1/2}} \dots\dots\dots (8)$$

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ \frac{(F+G+H)^{1/2}}{FG+GH+HF} \right\}}$$

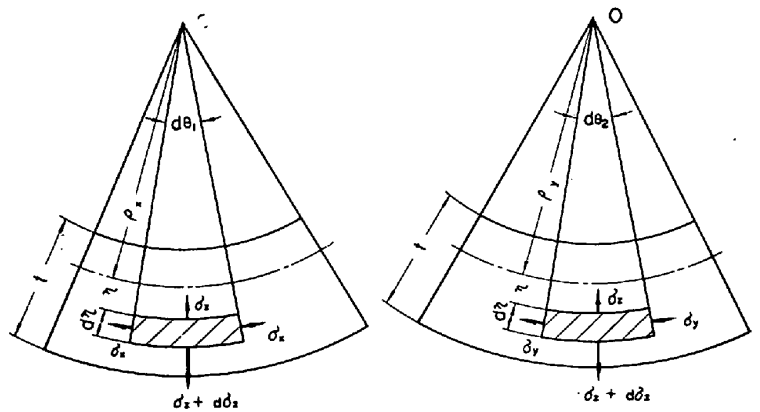


Fig. 1. Geometry of a bent sheet and stress components acting on a small element.

$$\times [F(G\epsilon_y - H\epsilon_z)^2 + G(H\epsilon_z - F\epsilon_x)^2 + H(F\epsilon_x - G\epsilon_y)^2]^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

この(8)式と(9)式の間には

$$\bar{\sigma} = c \bar{\epsilon}^n \dots\dots\dots (10)$$

の関係が成立するものとする。ここで、 n は考えている材料の加工硬化係数を、 c は材料固有の定数である。(8)式に(4)式を代入して整理すると

$$\bar{\sigma} = \alpha_3 |\sigma_x - \sigma_z| \dots\dots\dots (11)$$

ただし、

$$\alpha_3 = \sqrt{\frac{3}{2} \left\{ \frac{F\beta_1^2 + G + H\beta_2^2}{F+G+H} \right\}^{1/2}} \dots\dots\dots (12)$$

が得られ、(9)式に(2)式を代入すると

$$\bar{\epsilon} = \alpha_2 |\eta| \dots\dots\dots (13)$$

ただし、

$$\alpha_2 = \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ \frac{(F+G+H)^{1/2}}{FG+GH+HF} \right\} \left\{ F \left(\frac{H}{\rho_x} + \frac{G+H}{\rho_y} \right)^2 + G \left(\frac{F+H}{\rho_x} + \frac{H}{\rho_y} \right)^2 + H \left(\frac{F}{\rho_x} - \frac{G}{\rho_y} \right)^2 \right\}^{1/2}} \dots\dots\dots (14)$$

が得られる。これら(11)式と(13)式の間を(10)式に代入すると

$$|\sigma_x - \sigma_z| = \alpha_4 |\eta|^n \dots\dots\dots (15)$$

ただし

$$\alpha_4 = c \alpha_3^2 / \alpha_2 \dots\dots\dots (16)$$

となるので、(15)式と(4)式をつりあいの式(1)に用いることにより、境界条件を与えて具体的に応力分布を求めることができる。

3. スプリングバックの計算

曲げ変形を加えてから後に、外力を除くと変形がいく分もどる。この現象をスプリングバックという。これを求めるには、まず応力の分布を計算し、これにより曲げモーメントを求める。さて、板の引張り側では(15)式と(4)式を(1)式に用いると

$$\frac{d\sigma_z}{d\eta} = \frac{\alpha_4 \eta^n}{\rho_x + \eta} + \frac{\alpha_4 \beta_2 \eta^n}{\rho_y + \eta} \approx \frac{\alpha_4}{\rho_x} \left(1 - \frac{\eta}{\rho_x} \right) \eta^n + \frac{\alpha_4 \beta_2}{\rho_y} \left(1 - \frac{\eta}{\rho_y} \right) \eta^n \dots\dots\dots (17)$$

となるので、この式を積分して、境界条件として $\eta = t/2$

で $\sigma_z=0$ を与えると

$$\begin{aligned} \sigma_z = & \frac{\alpha_4}{\rho_x} \left[\frac{1}{n+1} \left\{ \eta^{n+1} - \left(\frac{t}{2}\right)^{n+1} \right\} \right. \\ & - \frac{1}{\rho_x(n+2)} \left\{ \eta^{n+2} - \left(\frac{t}{2}\right)^{n+2} \right\} \\ & + \frac{\alpha_4 \beta_1}{\rho_y} \left[\frac{1}{n+1} \left\{ \eta^{n+1} - \left(\frac{t}{2}\right)^{n+1} \right\} \right. \\ & - \frac{1}{\rho_y(n+2)} \left\{ \eta^{n+2} - \left(\frac{t}{2}\right)^{n+2} \right\} \left. \right] \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

となる。したがって、(15) 式と (4) 式より具体的に σ_x および σ_y を求めることができる。一方、圧縮側でも境界条件として、 $\eta=-t/2$ で $\sigma_z=0$ を考慮することにより σ_z が求められるので、同様にして σ_x と σ_y も求まり、モーメント M_x および M_y を決定することができる。すなわち

$$\begin{aligned} M_x = & \int_0^{t/2} (\sigma_x)_{\text{ten.}} \eta d\eta + \int_{-t/2}^0 (\sigma_x)_{\text{comp.}} \eta d\eta \\ = & \frac{2\alpha_4}{n+2} \left(\frac{t}{2}\right)^{n+2} \left\{ 1 + \frac{n+2}{2(n+4)} \left(\frac{1}{\rho_x^2} + \frac{\beta_1}{\rho_y^2}\right) \left(\frac{t}{2}\right)^2 \right\}, \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_y = & \int_0^{t/2} (\sigma_y)_{\text{ten.}} \eta d\eta + \int_{-t/2}^0 (\sigma_y)_{\text{comp.}} \eta d\eta \\ = & \frac{2\alpha_4 \beta_1}{n+2} \left(\frac{t}{2}\right)^{n+2} \left\{ 1 + \frac{n+2}{2\beta_1(n+4)} \left(\frac{1}{\rho_y^2} + \frac{\beta_1}{\rho_x^2}\right) \left(\frac{t}{2}\right)^2 \right\} \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

のように M_x と M_y が求まり、これよりスプリングバックを決定することができる¹⁰⁾。スプリングバックを曲率半径変化率として

$$-\Delta_x = \frac{D(1/\rho_x)}{1/\rho_x} = \frac{1/\rho'_x - 1/\rho_x}{1/\rho_x}, \dots\dots\dots (21)$$

$$-\Delta_y = \frac{D(1/\rho_y)}{1/\rho_y} = \frac{1/\rho'_y - 1/\rho_y}{1/\rho_y} \dots\dots\dots (22)$$

と定義すると、(19) 式と (20) 式より得られる M_x と M_y を用いて

$$-\Delta_x = \frac{\rho_x}{D(1-\nu^2)} (M_x - \nu M_y), \dots\dots\dots (23)$$

$$-\Delta_y = \frac{\rho_y}{D(1-\nu^2)} (M_y - \nu M_x) \dots\dots\dots (24)$$

と書きあらわされる。ただし、 D は板の曲げ剛性で

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \dots\dots\dots (25)$$

である。また ν はポアソン比、 E はヤング率を示す。

次に、圧延方向に対する引張り試験片の採取方向を α とすると、 r 値は

$$r = \frac{H + (2N - F - G - 4H) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha} \dots (26)$$

と書きあらわされ¹¹⁾、この式より圧延方向の r 値 r_0 と直角方向の r 値 r_{90} は、それぞれ次のように与えられる。

$$r_0 = H/G \dots\dots\dots (27)$$

$$r_{90} = H/F \dots\dots\dots (28)$$

この r_0 と r_{90} を用いて、材料特性を表現する α_4 の係数を求めると次のようになる。

$$\alpha_4 = \frac{c(2/3)^{n/2} (1/r_0 + 1/r_{90} + 1)^{n/2}}{(1/r_0 r_{90} + 1/r_0 + 1/r_{90})^n}$$

$$\begin{aligned} \times & \left\{ \frac{1}{r_{90}} \left(\frac{1}{\rho_x} + \frac{1+1/r_0}{\rho_y} \right)^2 + \frac{1}{r_0} \left(\frac{1+1/r_{90}}{\rho_x} + \frac{1}{\rho_y} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{1/r_{90} - 1/r_0}{\rho_x} - \frac{1/r_0}{\rho_y} \right)^2 \right\}^{n/2} \left\{ \frac{3(\beta_1^2/r_{90} + 1/r_0 + \beta_2^2)}{2(1/r_{90} + 1/r_0 + 1)} \right\}^{-1/2} \dots\dots\dots (29) \end{aligned}$$

ここで、計算を簡単にするため、球面ポンチで板を曲げた場合、すなわち ρ_x と ρ_y が等しい場合を考え、さらに特別の場合として、 $r_0=r_{90}=r$ の場合を考えると、スプリングバックを求める式は

$$\begin{aligned} -\Delta = & \frac{3(1-\nu)c}{2E(n+2)} \left(\frac{t}{2\rho}\right)^{n-1} \left\{ \frac{4(2+r)}{3} \right\}^{(n+1)/2} \\ & \times \left\{ 1 + \left(\frac{n+2}{n+4}\right) \left(\frac{t}{2\rho}\right)^2 \right\} \dots\dots\dots (30) \end{aligned}$$

と簡単化される。なお、講演は (29) 式を中心におこなう予定である。

4. 計算結果および結言

Fig. 2 は (30) 式を用い、曲げによるひずみ $(t/2\rho)$

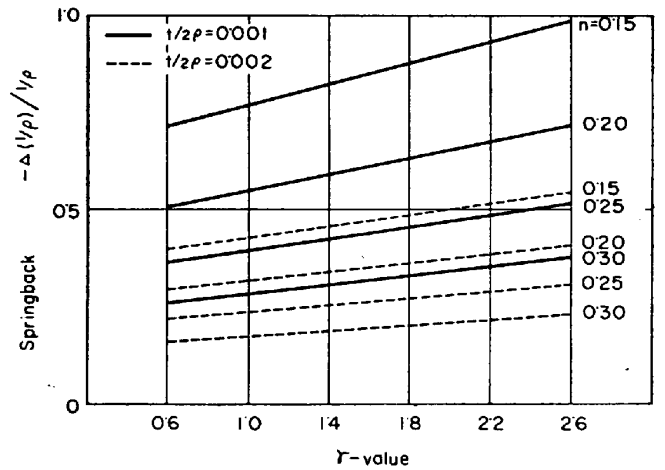


Fig. 2. Relation between springback and γ -value for the biaxial bending.

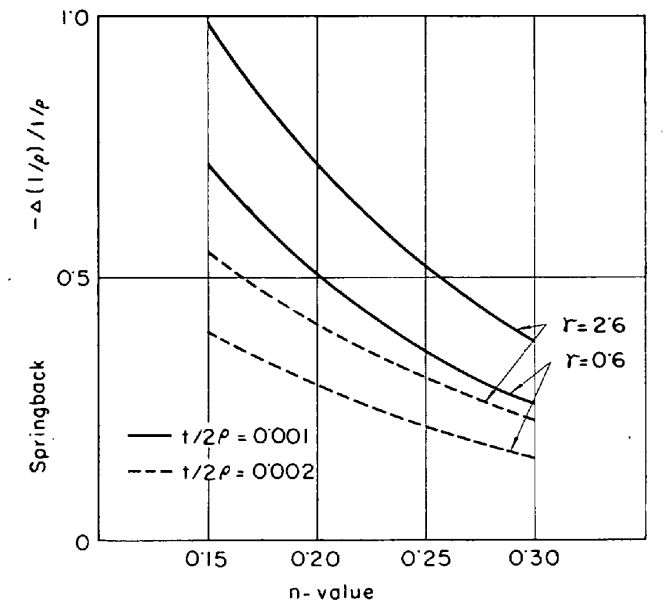


Fig. 3. Relation between springback and n -value for the biaxial bending.

として材料特性の影響が大きくあらわれるように、0.001 および 0.002 の小さなひずみを与え、*n* 値と *r* 値のスプリングバックにおよぼす影響を検討したものである。図から *n* 値が大きいほど、また *r* 値が小さいほどスプリングバックは小さくなるのがわかる。Fig. 3 は *n* 値を横軸にとり、*r* 値を 0.6, 2.6 に変化してスプリングバックを求めたものである。以上の考察はもつとも簡単な 2 軸の曲げについておこなったものであるため、実際のプレス加工で多くみられる場合とは、端部の条件および張力の付加による中立軸の移動など、かなり異なることが考えられるが、これらを考慮した場合については問題がきわめて複雑である。

文 献

- 1) 吉田：塑性と加工, 5 (1964) 37, p. 56
- 2) 津山, 昌谷, 阿部：第 15 回塑性加工連合講演会前刷集, p. 199
- 3) 阿部, 布施, 吉田, 福井：第 16 回塑性加工連合講演会前刷集, p. 33
- 4) 阿部, 矢能, 昌谷, 井ノ口, 山田：第 16 回塑性加工連合講演会前刷集, p. 37
- 5) 吉井, 吉田, 阿部：第 16 回塑性加工連合講演会前刷集, p. 89
- 6) 津山：塑性と加工, 6 (1965) 58, p. 607
- 7) 高橋, 中島：塑性と加工, 6 (1965) 58, p. 674
- 8) R. ヒル：塑性学, (1965), p. 313, 培風館
- 9) 山田：塑性力学, (1965), p. 88, 日刊工業新聞社
- 10) S. TIMOSHENKO: Theory of Plates and Shells, (1959), p. 429, McGraw-Hill
- 11) 山田：塑性と加工, 5 (1964) 38, p. 183

(204) 重油燃焼ボイラスケールの X 線回折法による同定

住友金属工業, 中央技術研究所
 理博 白岩 俊男・○松野二三朗
 Identification of Scales of Heavy Oil-Fired Boilers by X-Ray Diffraction Method.
 Dr. Toshio SHIRAIWA and Fumio MATSUNO.

1. 結 言

重油燃焼による腐食には重油灰に含まれるバナジウムの酸化物によつて主として起こると考えられる高温部腐食 (バナジウムアタック) がある。このバナジウムアタックは海外で発生したとの報告¹⁾がある。

バナジウムアタックの機構については諸説があるが、V₂O₅ が硫酸塩と共晶をつくり融点が低下すること、および溶融した液相における酸素の溶解度が異常に大きいことなどが原因であろうと考えられている²⁾。

われわれはボイラー管付着スケールの X 線回折分析を多く行なっているが、これらの中には V, Na, S を相当量含みバナジウムアタックを伴うスケールと考えられるものがしばしば存在し、これらに共通した不明線を見出した。

この同定は A. S. T. M X 線データファイルカードによる X 線回折分析ではデータが集録されておらず不可能

である。本研究はこのようなスケールの不明線の解明を目的としさらに Na-V-O 系の X 線回折データの集積を目的として行なつたものである。

2. ボイラー管付着スケールの X 線回折結果

ボイラー管付着スケールのうち V, Na を多量に含むスケールの X 線回折データを Table 1 に示す。

Table 1 において A は後述の V₂O₅, Na₂SO₄ 試薬による合成試料のデータであり、B, C, D, E はボイラー管付着スケールのデータである。

ボイラーの運転時間, 重油消費量, 試料採取位置を Table 2 に示す。これらの試料はいずれも暗緑色を呈している。Table 1 からこれらのボイラスケールの X 線回折像は類似しており同一の物質が存在すると考えられる。

Table 1. X-ray diffraction data of boiler scales on the fire side tubes of heavy oil-fired boilers and synthetic oxide.

A	B	C	D	E
10.6(Å) S	10.7(Å) S	(Å)	(Å)	(Å)
9.42 W	9.59 W			
8.85 S				
7.22 S	7.19 mW	7.19 S S	7.20 S S	
6.98 S S				6.85 W
5.77 WW				
5.33 WW				
4.98 WW	4.73 W	4.73 W	4.69 m	4.75 mW
4.74 WW				
4.27 WW	4.28 W		4.28 mW	4.25 S
			4.07 WW	
3.850WW	3.859WW	3.931 W	3.859 W	3.880mW
		3.831 W	3.697WW	
3.552WW		3.558 W	3.572 W	
3.507 W				3.502WW
3.453WW	3.467mW			
3.371 W	3.379 W	3.368 m		3.326 W
			3.274m S	3.245m S
3.202mW	3.206m S	3.196 W	3.196m S	
	3.168m S			3.149m S
3.106 W				
3.059 W	3.059 S	3.050 S	3.085 S	3.059 S
3.009 m	2.974 W			2.991 m
2.906 W	2.894m S	2.894 S		2.918 W
			2.789 S	2.768mW
2.714WW	2.706mW	2.706mW	2.706 W	2.679m S
2.659WW	2.634 m		2.646m S	
	2.584 W			2.578 W
2.492WW	2.513WW	2.513 W	2.524WW	
2.438WW				
2.370WW	2.372mW	2.373 W	2.372 W	2.387WW
	2.322mW		2.322m S	
2.267 m	2.252WW	2.252WW	2.270WW	
2.224WW			2.220WW	
2.172WW	2.173 W	2.169m S		2.156mW
2.135WW	2.136 W		2.244 W	
2.088WW	2.081mW		2.093 W	
2.060WW	1.994 W	2.055 W		2.077 m
	1.970 W	1.970mW		2.058m S
				1.970mW

A : synthetic oxide, B~E : boiler scale.
 (S : strong, m : medium, W : weak)