

(技術資料)

微小線源を用いた鉄鋼原料水分測定用中性子水分計商品化の足跡

Commercialization History of Neutron Moisture Gauge for Ironwork Raw Material Moisture Measurement Employing Low-level Radioactive Source



吉岡良浩*

Yoshihiro YOSHIOKA

Moisture contents of raw materials should be strictly controlled in ironwork. Therefore, neutron moisture gauges with high reliabilities are used for the measurements of moisture contents in coke. SHINKO ENGINEERING & MAINTENANCE CO., LTD has developed a highly accurate neutron moisture gauge, employing a radioactive source of 3.7MBq or less; the level low enough to be exempt from the regulatory requirements of authorization for use, health control of workers and setting of the radiation controlled area. The company started the sales of the product in 2000. This article explains the history of the commercialization of this neutron moisture gauge.

まえがき¹⁾²⁾ = 鉄鋼プロセスにおいて原材料の水分測定のニーズは高く、その中でも高炉に投入するコークスの水分測定は重要である。そのコークスの水分測定では、原料の色に左右されず、粉塵に強く、ホッパーなどの外部より非接触で非破壊、かつ連続的に測定することが求められてきた。

原材料の水分をオンラインで測定するための水分計は主に、水分が赤外線を吸収する原理を利用した赤外線式水分計、水分がマイクロ波を吸収する原理を利用したマイクロ波式水分計、および高速中性子が水に含まれる水素原子と衝突減速することにより低速の熱中性子が発生する原理を利用した中性子水分計がある。

これらのなかで、赤外線式水分計は表面水分しか測定できないことや、黒色物の測定の困難さ、光学系が粉塵に弱いなどコークスの水分測定には適していない。また、マイクロ波式水分計は、導電性であるコークスの水分を測定することはできない。このため、製鉄所でのコークスの水分測定は、従来から中性子水分計が使用されてきた(表1)。

しかし、大手電機メーカーが製造販売していた従来の中性子水分計は、中性子発生源に 3.7GBq から 18.5GBq と強い放射線源を内蔵しており、健康、安全面での管理を厳重に行う必要がある。このため、これを使用するには許認可や従事者の健康管理、放射線管理区域の設定が文部科学省より義務付けられていた。

そこで、株式会社神鋼エンジニアリング&メンテナンス(以下、神鋼 EN & M)では、放射線障害防止法に基づいた安全で使いやすい中性子水分計が必要と判断し、従来より3桁以上弱い放射能でも十分な測定精度が得られる水分計を開発し、2000年より販売してきた。これは、許認可や従事者の健康管理、放射線管理区域の設定が不要でありながら、安全でかつ従来機種と同等な精度で測定可能な機器である。さらに、2007年4月の放射線障害防止法改正に基づき、より安全性を高めた水分計を商品化した。

本報告ではこの中性子水分計の商品化の足跡について説明する。

表1 他方式水分計との比較表

Table 1 Comparison table with the other method moisture gauge

Method	Principle	Measurement depth range	Nondestructive measurement	Iron plate penetration	Accuracy
Neutron	Fast neutrons are slows down by scattering hydrogen atoms	Between surface and hundreds of millimeters			
Microwave	Microwave is decreased by giving energy to water molecule	Between surface and tens of millimeters		×	
Infrared	Infrared is decreased by giving energy to water molecule	Surface only		×	

* 神鋼エンジニアリング&メンテナンス 電気計装コンピュータ本部 電気計装部

1. 中性子水分計の概要

1.1 測定原理²⁾

中性子水分計のセンサプローブは、図1のように中性子を放出する中性子線源と熱中性子に感度を持つ検出器で構成される。

センサプローブに内蔵された中性子線源からは数MeVの高エネルギー高速中性子が放出される。この高速中性子は、質量の最も小さい水素原子（中性子とほぼ同一質量）と衝突を繰り返すとエネルギーを失い、低速の熱中性子（エネルギー：数十meV）に変化する。一方、中性子や水素原子より大きく重い炭素や酸素などの原子に衝突した場合、高速中性子は速度エネルギーをほとんど失わず、熱中性子に変化し難い（図2）。

このように、高速中性子が熱中性子に変化する量は測定対象物中の水素量に比例することから、熱中性子を選択的に検出する検出器を用いることによって、水分を測定することが可能となる。

1.2 中性子水分計の動作原理

図3に示すように、測定対象物の水素原子によって生成された熱中性子は、高電圧でバイアスされた熱中性子検出器によって電荷パルスに変換される。この電荷パ

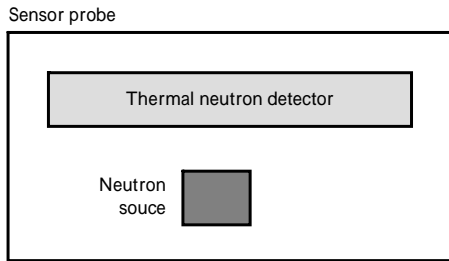


図1 中性子水分計センサプローブのブロック図
Fig. 1 Sensor probe block diagram of neutron moisture gauge

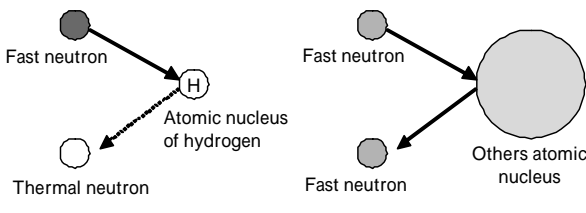


図2 熱中性子の発生原理
Fig. 2 Generation principle of thermal neutron

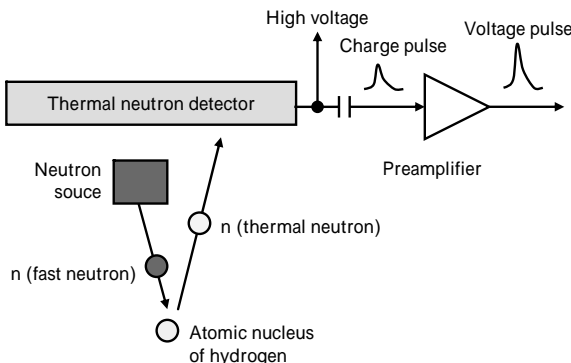


図3 中性子水分計の動作原理1
Fig. 3 Block diagram of neutron moisture gauge part 1

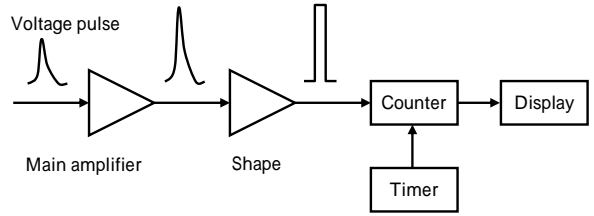


図4 中性子水分計の動作原理2
Fig. 4 Block diagram of neutron moisture gauge part 2

スは非常に微小であるためプリアンプで増幅、電圧変換された後、信号処理装置へ送られる。

信号処理装置内では主増幅器で増幅された後、波形整形されたパルスを単位時間当たりのパルス数としてカウント表示される（図4）。このカウント値は熱中性子数に比例するため水分値に値付けすることにより水分計として機能する。

2. 微小線源を用いた中性子水分計の開発

2.1 開発の背景

前述したように、従来大手電機メーカーが製造販売していた中性子水分計は中性子線源に²⁴¹AmBeを使用し、熱中性子検出器はBF₃比例計数管を使用していた。中性子線源の放射能は3.7GBqから18.5GBqと大きく、安全性確保のために、文部科学省からの使用許可の取得や作業従事者の健康管理、放射線管理区域の設定などの手続きが不可欠であった。また、大がかりな放射線遮蔽のため取扱いが不便なうえに製品が高価であり、多額の導入手続き費用も必要であった。

こうした背景から、神鋼EN&Mは1997年、微小線源を用いた低放射能中性子水分計の開発を開始した。

2.2 中性子線源と検出器の選択

開発に当たっては、操作性、安全性および法的規制の観点から、従来中性子水分計に使用されている線源の放射能の1/1,000から1/5,000である3.7MBq以下の中性子線源を採用することにした。一方、測定精度は単位時間当たり放出される中性子の発生量に比例し、同一核種の線源の場合、放射能が1/5,000となると単位時間当たりの中性子放出数も1/5,000となるため精度が極端に悪化してしまう。そこで、単位時間当たりの中性子放出効率の高い中性子線源²⁵²Cfを採用した。

²⁵²Cf中性子線源は自発核分裂によって中性子を放出し、単位放射能当たり発生する中性子数は²⁴¹AmBe中性子線源に比べ、約2,000倍と高効率である。ただし、²⁵²Cfの半減期は2.645年で²⁴¹AmBeの約430年に比べると寿命が短い。これについては線源を消耗品扱いとし、半減期～2半減期に1回交換する設定とした。

熱中性子検出器として採用した³He比例計数管はBF₃比例計数管に比べ、感度が約3倍である。これら²⁵²Cf線源と³He比例計数管の組合せにより、廉価でありながら従来品と同等な精度の製品を開発する目的がたち、図5、図6のような実験器を製作、神戸製鋼加古川製鉄所に焼結原料水分測定用として納入した。従来モデルとの比較表を表2に記す。

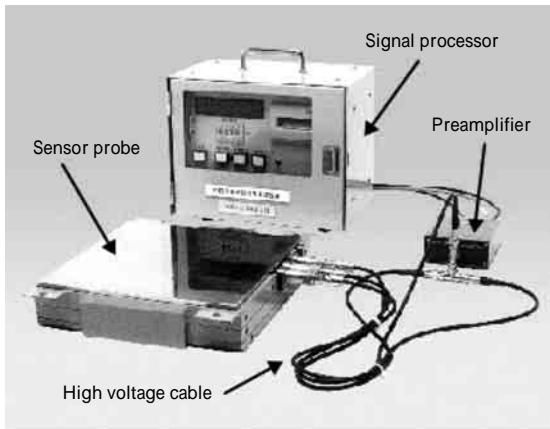


図 5 中性子水分計実験器
Fig. 5 Experiment equipment of neutron moisture gauge

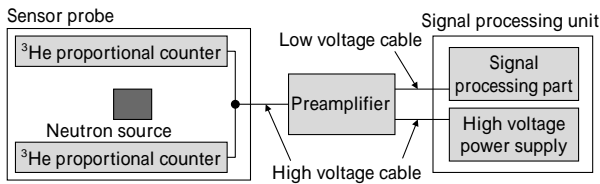


図 6 実験器のブロック図
Fig. 6 Block diagram of the experiment equipment

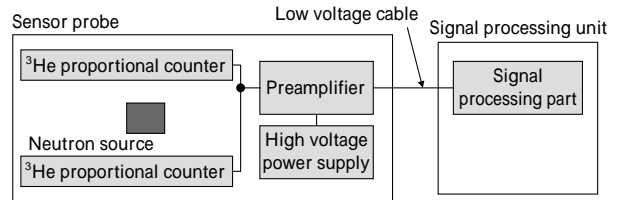


図 7 中性子水分計量産品のブロック図
Fig. 7 Block diagram of neutron moisture gauge

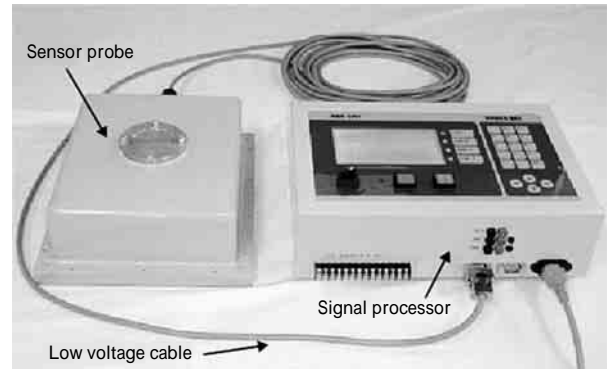


図 8 量産型中性子水分計 Model NMA2001
Fig. 8 Neutron moisture gauge commercial model NMA2001

表 2 線源と検出器の性能比較表

Table 2 Performance comparison table of Source and Detector

		Conventional model	NMG made by Shinko EN&M
Neutron source	Radioisotope	$^{241}\text{AmBe}$	^{252}Cf
	Activity	18.5GBq	3.7MBq
	Radioactive decay	$^{241}\text{Am} + ^9\text{Be}$ $^{12}\text{C} + n$	Spontaneous fission
	Neutron output (n/s)	1,090,000	444,000
	Half life	430 Year	2.645 Year
Detector	Type	BF_3 proportional counter	^3He proportional counter
	Thermal neutron detection principle	$^{10}\text{B} + n$ $^7\text{Li} +$	$^3\text{He} + n$ $^3\text{H} + p$
	Sensitivity (cps/nv)	2.1	15.6
	Life	1×10^9 COUNT	1×10^{12} COUNT

2.3 実験器の課題

開発した実験器を製鉄所の現場で安定して使用できる量産品とするためには以下の課題が残されていた。

- 1) 粉塵対策：プリアンプ、高圧ケーブルが外付け、検出器が露出されておりセンサプローブが防塵、防滴構造になっていないため、粉塵の多い製鉄所の現場にそのまま設置できなかった。
- 2) ノイズ対策： ^3He 比例計数管とプリアンプ間の配線は高電圧、高インピーダンスであり、誘導ノイズの多い現場ではノイズを拾い、測定精度に問題があった。
- 3) コスト低減：他社従来機種に比べ、廉価になったものの、普及させるためには高価であった。

2.4 量産型中性子水分計の開発と商品化

実験器の課題は、主に1) プリアンプの自社開発、2) ^3He 比例計数管のメーカー変更、3) 信号処理装置の標準化によって解決することができた。これを受けて1999年、図7の量産型中性子水分計の開発を開始し、コストを半減することによって2000年に商品化に成功した(図8)。

以下に、自社開発の効果がとくに大きかったプリアンプについてその内容を詳述する。

2.4.1 高圧電源内蔵型プリアンプの自社開発

プリアンプは日本の商社を通じて米国製を輸入していたが、大きく、かつ高価であった。自社開発品は高圧電源を内蔵しながら大きさを約1/3とし、密閉されたセンサプローブに内蔵することができた。これによって、 ^3He 比例計数管との配線距離の縮小化が図られ、誘導ノイズの低減を実現することができた。さらに信号処

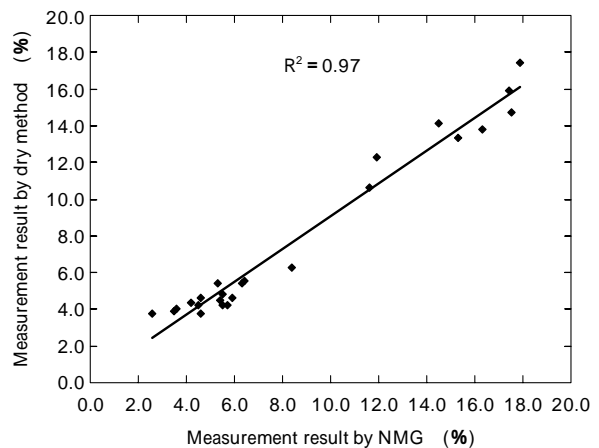


図 9 乾燥重量測定法との相関グラフ
Fig. 9 Correlation between dry method and neutron method

理装置間のケーブルを低圧化でき、センサプローブを防塵、防滴構造とすることができた。

2.5 量産型中性子水分計の精度

中性子水分計の精度の評価は、一般的に測定対象物の乾燥前重量と乾燥後重量の差から水分を求める加熱乾燥重量測定法との相関関係で評価する。図9のグラフは2002年に某製鉄所へ納入した時の評価グラフで、 $R^2 = 0.97$ と非常に強い相関を表している。

2.6 量産型中性子水分計の販売実績

表3に量産型中性子水分計の販売実績を記す。

表3 量産型中性子水分計の販売実績表
Table 3 Sales record of model NMA2001

No.	Sold years	Customer	Measurement object
1	Aug - 00	Ironworks	Coke
2	Mar - 01	Ironworks	Coke
3	Jul - 01	Construction company	Sand
4	Oct - 01	Ironworks	Coke
5	Oct - 02	Ironworks	Coke
6	Oct - 02	Ironworks	Coke
8	Oct - 02	Ironworks	Coke
9	Oct - 02	Ironworks	Coke
10	Feb - 03	Ironworks	Coke
11	Feb - 03	Ironworks	Coke
12	Feb - 03	Ironworks	Lime
13	Feb - 03	Ironworks	Lime
14	Feb - 03	Chemical factory	Others
15	Oct - 03	Kobe Steel	Others
16	Jul - 04	Ironworks	Coke
17	Jul - 04	Ironworks	Coke
18	Jul - 04	Ironworks	Coke
19	Jul - 04	Ironworks	Coke
20	Jul - 04	Ironworks	Coke
21	Jul - 04	Ironworks	Coke
22	Jul - 04	Ironworks	Coke
23	Aug - 04	Ironworks	Coke
24	Aug - 04	Chemical factory	Coke
25	Aug - 04	Ironworks	Sintered ore
26	Jan - 05	Ironworks	Coke
27	Jan - 05	Ironworks	Coke
28	Apr - 05	Construction company	Sand
29	Oct - 05	Chemical factory	Coke
30	Oct - 05	Ironworks	Coke
31	Oct - 05	Kobe Steel	Coke
32	Jun - 06	Ironworks	Coke
33	Nov - 06	Kobe Steel	Coke
34	Nov - 06	Kobe Steel	Coke
35	Mar - 07	Chemical factory	Coke

3. 放射線障害防止法改正への対応

2005年4月に国際基本安全基準に準拠するように放射線障害防止法が改正され(2007年3月までは旧法からの移行期間)、神鋼EN&Mの中性子水分計も規制対象となった。使用者がこれまでと同等の条件で使用できるようにするためには、以下の条件を満たす、より安全性を高めた表示付き認証機器として国の認定を受ける必要がある。

- 1) 通常の使用状態で使用者の年間被ばく量が1mSv以下であること
- 2) 線源の輸送は表面の漏洩線量が5 μ Sv以下のL型輸送物であることが要求される。

1)については、使用者が中性子水分計に近づく距離と時間に制限を設けることによって年間被ばく量を1mSv以下に抑え、また2)についても中性子の遮蔽能力を高めた輸送箱を新たに開発することによりL型輸送物の基準をクリアし、2006年12月、表示付き認証機器の認定を取得した。

むすび = 神鋼EN&M製中性子水分計の現行品MODEL NMA2001は2000年に商品化され広く活用されて来た。しかし、7年経過した現在まで一度もモデルチェンジを行っておらず、最近の工業用計測機器に比べ、操作性、外部インターフェイスの面で充実しているとは言えない。

今後はパソコンや制御用コンピュータとのインターフェイスの装備やタッチパネルの搭載など、操作性を向上させたモデルチェンジを行っていく予定である。

参考文献

- 1) 種本敬久ほか：材料とプロセス，Vol.12, No.5 (1999) p.902.
- 2) 吉岡良浩：石灰，No.542 (2005) p.33.