

Fe-Cu 2 元合金の熱起電力測定

Measurement of Thermoelectric Power of Fe-Cu Binary Alloys

上坊寺 克郎 (Katsuo Joubouji)*

要約 原子力安全システム研究所 (INSS) では、これまで熱起電力法による鑄造 2 相ステンレス鋼の熱時効の非破壊評価の研究を実施してきたが、本手法の低合金鋼の照射脆化への適用を検討している。熱起電力法では、材料劣化を引き起こす要因となる組織変化により生じる熱起電力変化と材料の劣化程度の間接的な関係をとって劣化評価を実施するため、低合金鋼の照射脆化に本手法を適用する場合は、脆化の主要因の 1 つである Cu 析出に伴う熱起電力変化を観測することが求められる。そこでまず、Cu 濃度を変えた Fe-Cu 合金を製作して、その熱起電力を測定し、熱起電力により Cu 濃度が捉えられることを確認した。また、Fe-Cu 合金の測定において、これまで 2 相ステンレス鋼において使用してきた測定方法を適用することが妥当であるかを確認した。その結果、Fe-Cu 合金の熱起電力は含有する Cu の増加に伴って負の方向へ変化し、その変化率として $-6.6\mu\text{V}/\text{C} / \text{wt}\% \text{Cu}$ が得られた。なお、Fe-Cu 合金の測定では計測値の安定に要する時間が 2 相ステンレス鋼の場合よりはるかに長く、20 分近くかかる場合もあったため、1 点あたりの測定時間を 2 相ステンレス鋼の場合より長くし、60 分とした。

キーワード 熱起電力, Fe-Cu 合金, 照射脆化, 非破壊評価

Abstract In INSS, non-destructive evaluation (NDE) of irradiation embrittlement of low alloy steel using thermoelectric power (TEP) measurement has been considered, as well as NDE of thermal aging of cast duplex stainless steel which has been studied in recent years. Material degradation is evaluated based on a relation between progress of the degradation and change in TEP due to change in material structure caused by the degradation event. So it is necessary for NDE of irradiation embrittlement to measure the change in TEP due to precipitation of Cu contained as an impurity, which is known as one of the reasons for the embrittlement. In this study, TEP of Fe-Cu binary alloys with different Cu content was measured for investigation of the relationship between TEP of the alloys and Cu content. In addition, appropriateness of measuring TEP of Fe-Cu binary alloy in the same way to measure TEP of duplex stainless steel was examined. It was found that increment of Cu contained in the alloys changed TEP in a negative direction and the rate was evaluated as $-6.6\mu\text{V}/\text{K}/\text{wt}\%\text{Cu}$. There were the cases that it took 20 minutes for measurement values to become stable in measurement of Fe-Cu binary alloys. It was much longer than the time taken in measurement of duplex stainless steel. So the measurement time per a point was extended to 60 minutes in case of Fe-Cu binary alloys.

keywords thermoelectric power, Fe-Cu binary alloy, irradiation embrittlement, non destructive evaluation

1. はじめに

原子炉容器は炉心を内包するとともに 1 次冷却材の圧力バウンダリを構成する重要機器の 1 つであるが、ステンレス鋼を内張りした低合金鋼から成り、加圧水型軽水炉の場合、その厚さは約 20cm になる。低合金鋼については供用期間中に中性子照射により遷移温度の上昇と上部棚エネルギーの低下が生じること (中性子照射脆化) が知られている⁽¹⁾。現在

は、運転開始時に炉内に挿入された原子炉容器と同一の材料から製作された監視試験片 (シャルピー衝撃試験片や引張試験片) を定期的に取り出して破壊試験を実施することにより中性子照射に伴う脆化程度を実測・監視し⁽²⁾⁽³⁾、健全性が維持されていることが確認されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし、当初予定の供用期間の延長に伴い、炉内に装備されている監視試験片に不足が生じる可能性がある。その対策として、使用済の監視試験片の再生⁽⁶⁾や使用済の監視試験片

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

からの小型試験片の製作⁽⁷⁾の研究が進められている。また、監視試験片の脆化の非破壊評価手法の研究も実施されており^{(8)~(16)}、国内では、超音波特性⁽⁸⁾や磁気特性^{(9) (10)}を利用した評価手法が報告されている。欧州では、原子力発電所の重要設備の材料劣化を非破壊的に監視する技術の調査を目的とした研究プロジェクト（2000～2003）が実施され、複数の研究機関がそれぞれの持つ非破壊評価手法を用いて照射材料のラウンドロビン試験を行っている^{(11)~(13)}。そこには熱起電力を利用した評価手法も含まれており、熱起電力が照射脆化に対して敏感に反応したことを報告している⁽¹³⁾。

低合金鋼の照射脆化の主要因の1つは、鋼中に含まれる不純物であるCuの析出とされており⁽¹⁾、照射脆化に関連する研究では実用鋼の他にFe-Cu系合金がしばしば用いられて、Cuの析出の過程や形態等が調べられている一方^{(17)~(21)}、このCuの挙動により材料の熱起電力が変化することも観測され⁽¹⁴⁾⁽²²⁾、それはFe中に固溶するCuの減少を感知した結果と報告されている⁽¹⁴⁾。

原子力安全システム研究所（以下「INSS」という）ではこれまで、熱起電力法による casting 2相ステンレス鋼の熱時効の非破壊評価の研究を実施してきたが^{(23)~(28)}、本手法の低合金鋼の照射脆化への適用を検討している。熱起電力法では、熱起電力が材料の組成や組織に敏感に反応することを利用して、材料劣化を引き起こす組織変化により生じる熱起電力変化と材料劣化の程度の間を基に劣化評価を実施する。従って、Cuの析出に伴い変化する材料の熱起電力を観測できなければ、照射脆化への適用はか

なわない。そこでまず、Cu濃度を変えたFe-Cu合金を製作し、これまでの研究で使用してきた熱起電力測定装置によりその熱起電力を測定し、Cu濃度と熱起電力の関係を確認した。また、Fe系合金の測定において、2相ステンレス鋼における測定方法を適用することが妥当であるかを確認した。

2. 実験方法

2.1 供試体

Cu濃度を変えた2種類のFe-Cu合金の他に、比較のために純Feを用意した。これらの成分分析結果は表1の通りである。

Fe-Cu合金の試料は、真空溶解炉により casting した鑄塊を1100℃で鍛造して200×95×45mmの寸法にした後、固溶化熱処理として850℃で2時間保持し、水冷した。固溶化熱処理後のスラブから切り出した試験片は表2と図1に示す通りであり、試験片2A2, 2A3, 5A2, 5A3は切り欠きを設けていないがシャルピー衝撃試験片の寸法と一致させてある。なお、純Feは80×38×20mmの平板である。

2.2 熱起電力測定

2.2.1 熱起電力の測定原理

図2に示すように、温度の異なる2つの電極を異種金属の材料表面に押し当てると、2点間に温度差 ΔT が生じることに伴い、電位差 ΔV が発生するが

表1 使用した材料の成分分析結果

	化学成分(Fe-Cu合金についてはwt%, 純Feについてはppm)										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	O	N
純Fe	13	< 10	1	-	-	2	11	-	3	465	29
Fe-0.2Cu合金	0.001	< 0.01	< 0.01	< 0.001	0.001	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.19	0.092	0.0013
Fe-0.5Cu合金	0.001	< 0.01	< 0.01	< 0.001	0.001	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.48	0.087	0.0019

表2 使用した試験片 (Lは鍛造方向)

	名称	寸法 (L × W × T)
Fe-0.2Cu合金	2A1	65 × 60 × 10 (mm)
	2A2	10 × 55 × 10 (mm)
	2A3	55 × 10 × 10 (mm)
Fe-0.5Cu合金	5A1	65 × 60 × 10 (mm)
	5A2	10 × 55 × 10 (mm)
	5A3	55 × 10 × 10 (mm)

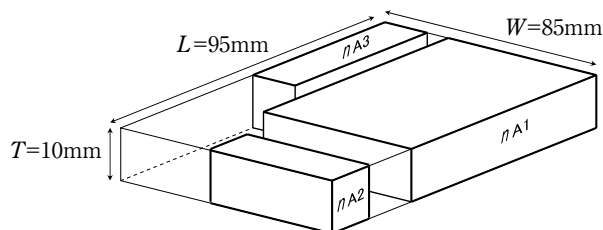


図1 使用した試験片 (n = 2, 5)

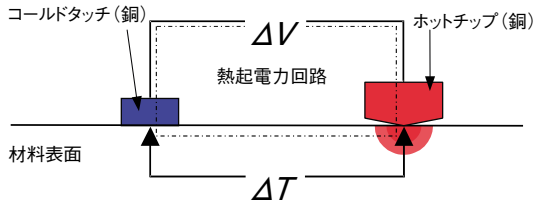


図2 熱起電力測定原理



図3 熱起電力測定装置⁽²⁶⁾

(ゼーベック効果), この両者を測定することにより熱起電力を算出する. ここで, 熱起電力は $\Delta V/\Delta T$ と定義し, 単位は $\mu V/^\circ C$ となる.

本研究で用いた熱起電力測定装置⁽²⁶⁾を図3に示す. 測定装置は, 電極を装備した測定部と計器類と制御パネルを装備した制御部, データロガーのPCの3部から構成されている. 測定部に装備された2つの電極(ホットチップとコールドタッチ)には銅を使用している. 測定中, ホットチップは40°Cに保持された状態で駆動機構により下降・上昇し, 材料との接触時には約30Nの力で材料表面に押しつけられる. コールドタッチは材料表面の温度とほぼ等しくなっている. 2点間の温度差 ΔT をホットチップとコールドタッチの中にそれぞれ埋め込んだ白金測温抵抗体により検出し, 電位差 ΔV をホットチップとコールドタッチから引き出した導線により検出し, 測定系内部で生じる熱起電力等の影響を補正して, 材料の熱起電力を算出する. なお, 算出される値は電極である銅の熱起電力に対する相対値である.

2.2.2 測定方法

板状の試験片(純Fe, 2A1, 5A1)では $L \times W$ 面の2面, 棒状の試験片(2A2, 2A3, 5A2, 5A3)については $55 \times 10\text{mm}$ の4面(2A2と5A2では $W \times L$ 面と $W \times T$ 面, 2A3と5A3では $L \times W$ 面と $L \times T$ 面)について測定を実施した.

今回の測定では, Fe-Cu合金の測定の際の各計測値の挙動を把握するため, 測定方法を従来の方法(2相ステンレス鋼の場合⁽²⁷⁾)から変更した. 2相ステンレス鋼の場合は, 図4に示すようにホットチップがサンプルに接触し設定荷重に到達してから5秒後に15回の計測(サンプリング時間1秒)を行い, これを3回繰り返して当該位置の測定とし, 1度の測

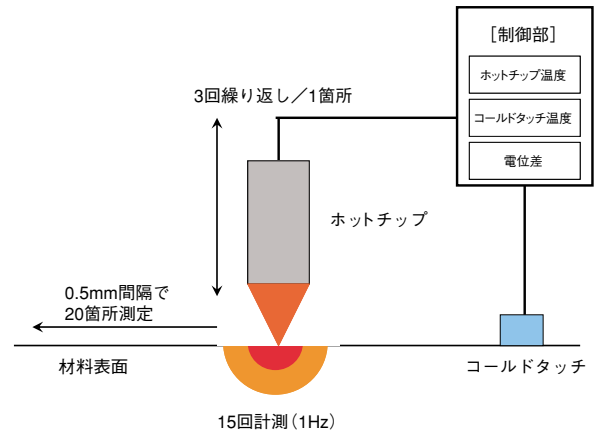


図4 従来の測定方法(2相ステンレス鋼の場合⁽²⁷⁾)

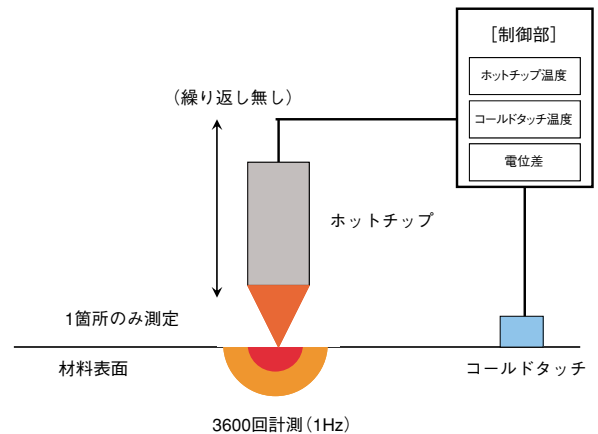


図5 今回の測定方法

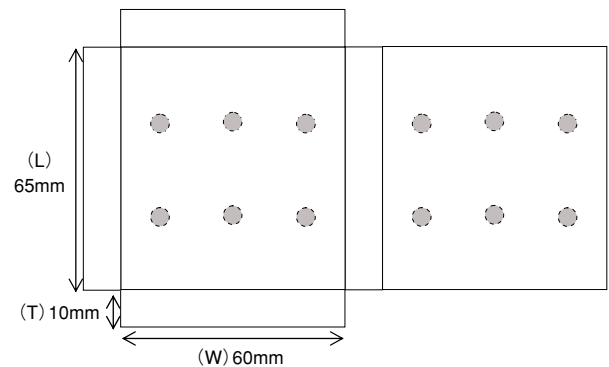


図6 熱起電力の測定箇所: 2A1, 5A1

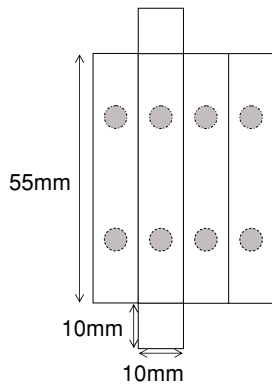


図7 熱起電力の測定箇所：2A2, 2A3, 5A2, 5A3

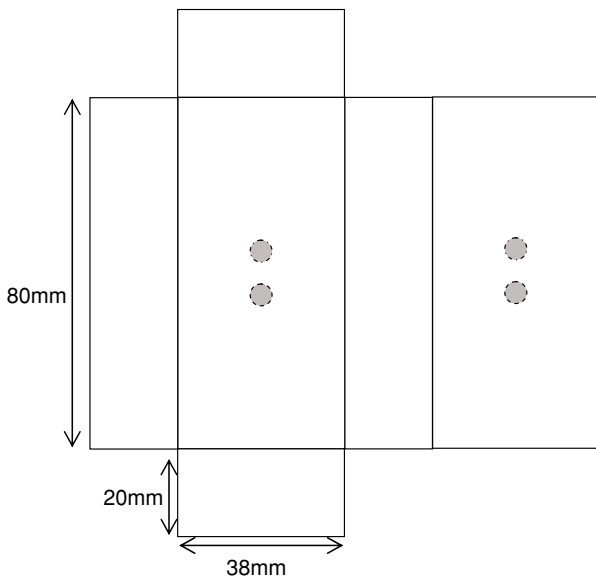


図8 熱起電力の測定箇所：純 Fe (図中の円はホットチップの接触位置を示す)

定でこれを 0.5mm 間隔で 20 箇所行った。今回は、図 5 に示すようにホットチップがサンプルに接触し設定荷重に到達した時点から 3600 回の計測（サンプリング時間 1 秒）を行って当該位置の測定とし、1 度の測定でこれを 1 箇所のみ行い、同様の測定をホットチップの接触位置を変えて実施した。

図 6～図 8 に示す通り、純 Fe については 4 箇所、Fe-Cu 合金については、板状の試験片の場合で 1 面につき 6 箇所の計 12 箇所、棒状の試験片の場合で 1 面につき 2 箇所の計 8 箇所の測定を実施した。

3. 実験結果と考察

3.1 Fe-Cu 合金の測定における計測値の挙動

Fe-Cu 合金における測定結果の例を図 9 と図 10 に示す。それぞれ、2A1 の $L \times W$ 面、2A2 の $L \times W$ 面における結果である。比較のため、铸造 2 相ステンレス鋼（フェライト量 7.3% の未時効材⁽²⁷⁾）を同様の方法で測定した結果を図 11 に示す。この図からは、铸造 2 相ステンレス鋼の場合は、 $\Delta V/\Delta T$ がホットチップの設定荷重到達後すぐに安定することが分かる。一方、Fe-Cu 合金の場合には、ホットチップが設定荷重に到達後のしばらくの間、 $\Delta V/\Delta T$ が安定していない。この事象は Fe-Cu 合金の他の試験片でも観測され、安定するまでに要する期間も定まっていなかった。

従来の測定方法ではホットチップが接触している期間は約 20 秒で、それを 1 度の測定で 60 回繰り返しているため、Fe-Cu 合金の測定において採用すると $\Delta V/\Delta T$ が安定していない期間のデータを採取す

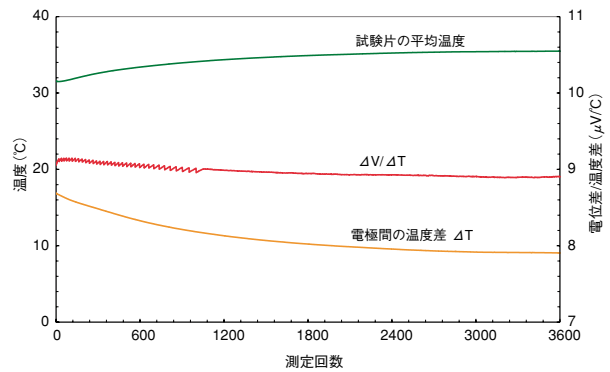


図9 測定結果例：2A1 ($L \times W$ 面)

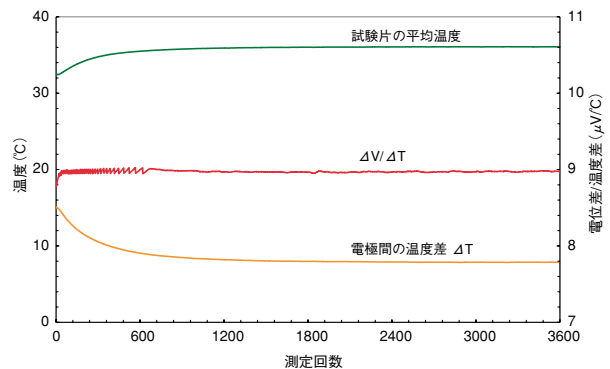


図10 測定結果例：2A2 ($L \times W$ 面)

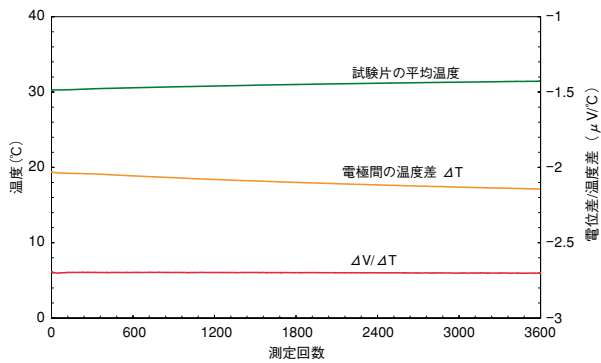


図 11 測定結果例：铸造 2 相ステンレス鋼（フェライト量 7.3% の未時効材⁽²⁷⁾）

ることになる。また、図 9 と図 10 で見られる $\Delta V/\Delta T$ の変動は、全ての Fe-Cu 合金の試験片について、測定開始から 1200 回以降では観測されなかった。

そこで、今回は測定方法を従来の 2 相ステンレス鋼の場合から変更し、さらに 3600 回の測定の中の 1201 回から 3600 回までの計 2400 回のデータを利用することにした。

3.2 試験片温度の変化に伴う熱起電力の変化

熱起電力は材料温度の変化に伴って変化するため⁽²⁹⁾、熱起電力の比較を行う場合には、対象とする材料間で材料温度を統一することが必要である。今回使用した測定装置では図 9～図 11 から分かるように、試験片温度を任意な値で一定に保持することができないため、温度変化の影響を補正することが必要になる⁽²⁴⁾。そこで、各材料について、熱起電力の試験片温度に対する変化率を求めた。なお、試験片温度はホットチップとコールドタッチの温度の平均としている。

ホットチップの設定温度は 35°C、40°C、45°C および 50°C の 4 通りとし、測定位置変更の影響を除外するため、ホットチップの接触位置は試験片毎に固定して 4 通りの設定温度での測定を連続して実施した。測定は、Fe-0.2Cu 合金については 2A1 と 2A2 でそれぞれ 1 箇所計 2 箇所、Fe-0.5Cu 合金については 5A1 と 5A2 でそれぞれ 1 箇所計 2 箇所、純 Fe については 1 箇所とした。

各測定の結果を試験片の平均温度で整理すると、図 12 のようになった。この図からは、温度変化に対

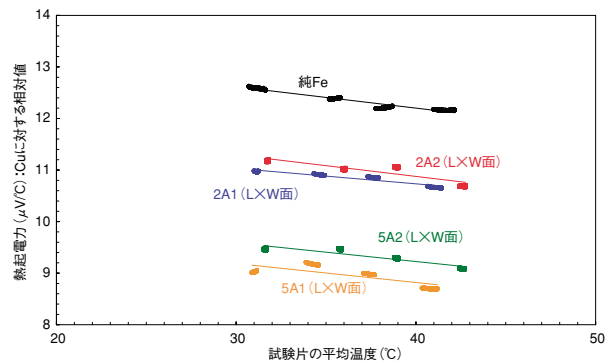


図 12 試験片温度に対する熱起電力の変化

する熱起電力の勾配として、2A1： $-0.030 \mu\text{V}/^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ 、2A2： $-0.042 \mu\text{V}/^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ が得られたので、これらを平均し、Fe-0.2Cu 合金の場合は $-0.036 \mu\text{V}/^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ となった。同様に温度変化に対する熱起電力の勾配として、5A1： $-0.036 \mu\text{V}/^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ 、5A2： $-0.037 \mu\text{V}/^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ が得られ、Fe-0.5Cu 合金の場合は $-0.037 \mu\text{V}/^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ となった。一方、純 Fe の場合の温度変化に対する熱起電力の勾配は $-0.041 \mu\text{V}/^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ となった。3.3 節ではこれらを用いて計測値の補正を行い、試験片の温度が 20°C である時の熱起電力を算出している。

今回得られた Fe-Cu 合金の熱起電力の変化率は 2 相ステンレス鋼の場合の $-0.0085 \mu\text{V}/^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ と比較すると約 4～5 倍の大きさとなっており、温度による補正量が大きくなる。これにより、Fe 系合金の測定においては、材料の熱起電力の温度に対する変化率に関して、従来よりも注意を払う必要があることを確認した。

3.3 Fe-Cu 合金の熱起電力

3.3.1 熱起電力の測定結果

ホットチップの温度を 40°C に設定して得られた測定結果と 3.2 節で得られた熱起電力の温度に対する変化率から、各材料について 20°C における熱起電力を求めた。

純 Fe の熱起電力は 300K (約 27°C) において $15 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ であり⁽²⁹⁾、Cu の熱起電力は 300K において $1.83 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ である⁽²⁹⁾。2.2.1 で述べたように、今回の測定装置では Cu の熱起電力に対する相対値が得られるので、純 Fe であれば $13.2 (= 15 - 1.83)$

$\mu\text{V}/\text{C}$ と測定されることが予測されたが、今回の測定では $13.1 \mu\text{V}/\text{C}$ が得られ、予測に近い値であった。また、各測定において、ホットチップの設定荷重到達後 1201 回目から 600 回毎に $\Delta V/\Delta T$ と平均温度の標準偏差を計算するとそれぞれ $0.01 \mu\text{V}/\text{C}$ 、 0.2C より小さくなるものがほとんどであり、計測値の安定した期間のデータが採取できている。算出された熱起電力の標準偏差も概ね $0.01 \mu\text{V}/\text{C}$ 程度でばらつきの小さい結果となっており、今回採用した測定方法が不相当でなかったと判断している。

しかし、同一試験片あるいは同一材料としてデータを集積すると熱起電力の標準偏差は概ね $0.1 \mu\text{V}/\text{C}$ を越える値となった。例として図 13 に 2A1 の 12 箇所測定から得られた計 28,800 個 (2400 個 \times 12 箇所) のデータの分布を示す。なお、図中の誤差棒は測定での標準偏差を示す。比較として図 14 に 2 相ステンレス鋼の場合の測定データの分布を示す。図 14 では、図 4 で示した従来の測定方法を採用して $100 \times 100 \times 20\text{mm}$ の平板試験片について 10 回の測定で得た 9000 個 (15 回 \times 3 箇所 \times 20 箇所 \times 10 回) のデータを整理している。図 13 と図 14 から、2 相ステンレス鋼では位置を変えて 2, 3 回の測定をするだけであっても最終的に計算される平均値は測定位置にそれほど依存しないのに対し、Fe-Cu 合金の熱起電力はばらつきが大きく、測定位置とその数の選び方によっては最終的に計算される平均値の違いが小さくない場合が想定される。測定のばらつきには、装置側の測定精度に起因するばらつきと対象材料の不均一性に起因するばらつきがある⁽³⁰⁾。前者については材料に関わらず現れることになるため、今回観測された違いは後者に起因することになるが、不均一ではない純 Fe における 4 箇所の測定

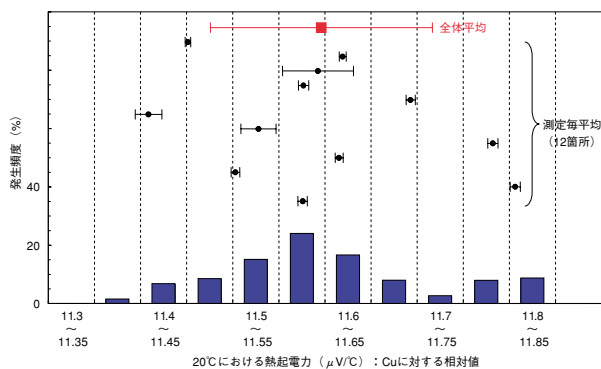


図 13 熱起電力のばらつき：Fe-Cu 合金 (平板試験片 2A1) の場合

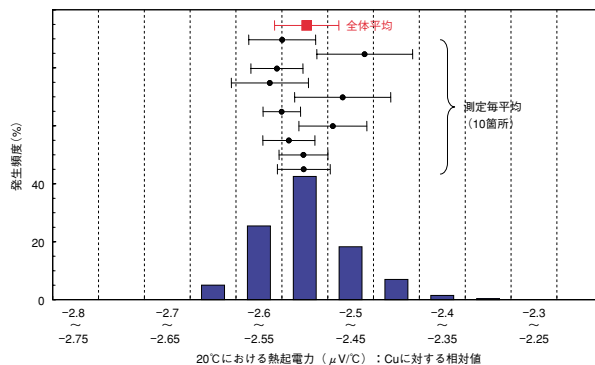


図 14 熱起電力のばらつき：2 相ステンレス鋼 (フェライト量 14.6% の未時効材) の場合

であっても標準偏差が $0.11 \mu\text{V}/\text{C}$ となっており、Fe-Cu 合金の場合が特別大きいわけではない。ところで、材料の熱伝導率が高いと測定精度が低下することも報告されている⁽³⁰⁾。純 Fe の熱伝導率が $73.3\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ (20C において)⁽³¹⁾、図 14 の 2 相ステンレス鋼では約 $13\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ (25C において) であることから⁽²⁵⁾、純 Fe と Fe-Cu 合金の測定が 2 相ステンレス鋼の場合よりばらついた結果となった主要因は、熱伝導率の影響と判断される。一方、低合金鋼の熱伝導率は、 $0\text{C} \sim 200\text{C}$ の範囲で $30 \sim 50 \text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ となっており⁽³²⁾、純 Fe より小さいが 2 相ステンレス鋼より大きい。従って、低合金鋼の熱起電力測定を実施する場合もこの影響を避けることができないと考えるべきである。本研究とは測定装置と測定手法が異なるが、実際に原子炉容器材料の受入れ材を測定した事例では、標準偏差が $0.16 \mu\text{V}/\text{C}$ となったことが報告されている⁽³³⁾。

3.3.2 熱起電力に対する Cu の影響

Fe-Cu 合金と純 Fe の測定結果を Cu 濃度に関して整理すると図 15 のようになり、材料中に含有される Cu 濃度の上昇に伴い、熱起電力は負の方向へ変化することが分かる。そして、得られた 3 個のデータから、その変化率は試験片温度 20C において $-6.6 \mu\text{V}/\text{C}/\text{wt}\% \text{ Cu}$ と計算された。今回の測定において標準偏差が最大なのは Fe-0.2Cu 合金の $0.17 \mu\text{V}/\text{C}$ であるが、仮にこの値が最大の偏差になるとすれば、今回の測定装置の熱起電力から Cu 濃度を評価すると誤差は $0.03\text{wt}\%$ となる。

ところで、Miloudi らは Fe-Cu 合金の 20C にお

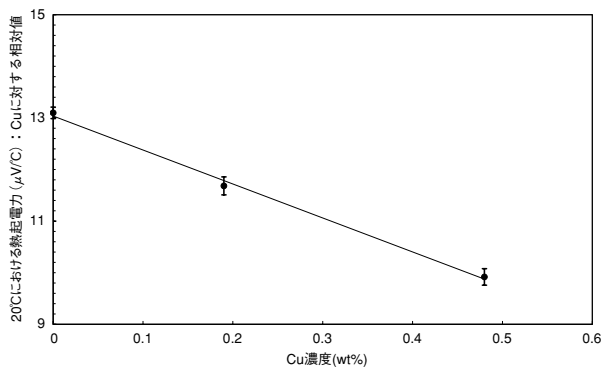


図 15 Cu 濃度に対する熱起電力変化

る熱起電力と Cu 濃度の関係を

$$\text{Cu (wt\%)} = 0.43 - 0.14 \times (\text{熱起電力 : } \mu\text{V}/^\circ\text{C}) \quad (1)$$

としており⁽²²⁾, これを 1wt% の Cu 当りの変化に換算すると $-7.1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ となり, 今回得られた値と近い値となっている. なお, 今回得られた結果と式(1)において, 切片が大きく異なるのは, 主として, 測定装置で使用している電極の違いのために基準となる熱起電力が異なること (今回使用した装置は Cu を用いているが, Miloudi らは Fe を使用) に起因すると考える.

4. まとめ

INSS ではこれまで, 熱起電力法による casting 2 相ステンレス鋼の熱時効の非破壊評価の研究を実施してきたが, 本手法の低合金鋼の照射脆化への適用を検討している. そこで, 手始めとして, 低合金鋼の照射脆化に関する研究において供試体としてよく利用される Fe-Cu 合金を製作し, その熱起電力と Cu 濃度の関係を確認した. また, Fe 系合金の測定において, 2 相ステンレス鋼における測定方法を適用することが妥当であるかを確認した. 結果は以下の通りである.

- (1) Fe-Cu 合金では, 熱起電力測定時の計測値の安定に要する時間が 2 相ステンレス鋼よりはるかに長かった. そこで, 2 相ステンレス鋼において採用した測定方法をそのまま適用するのは適当でないと判断した. そのため, 今回は 1 度に短時間の測定を多数の位置で行うのではなく, 長時間の測定を 1 点毎に行う形にした.
- (2) Fe-Cu 合金の熱起電力は, 含有する Cu の増

加に伴って負の方向へ変化し, その変化率として $-6.6 \mu\text{V}/^\circ\text{C} / \text{wt\% Cu}$ が得られた. なお, この結果を用いて Cu 濃度を評価するとすれば, 熱起電力測定における標準偏差の最大値 ($0.17 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) との比較から, 熱起電力測定のばらつきに伴う Cu 濃度の評価誤差は 0.03wt% 程度になる.

文献

- (1) 福谷耕司, 大野勝巳, 中田早人, 原子炉容器鋼の照射組織変化, 原子力安全システム研究所, モノグラフ, Vol.1, p.1 (2001).
- (2) (社)日本電気協会, 原子炉構造材の監視試験方法, JEAC4201-2004, (2005).
- (3) (社)日本電気協会, 原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法, JEAC4206-2004, (2005).
- (4) (独)原子力安全基盤機構, 高経年化技術評価審査マニュアル原子炉压力容器の中性子照射脆化, JNES-SS-0507-01, (2006).
- (5) 例えば, (独)原子力安全基盤機構, 高経年化技術評価等報告書に対する技術審査報告書 (関西電力株式会社美浜発電所 3 号機), (2006).
- (6) (独)原子力安全基盤機構, 原子炉压力容器監視試験片の再生に関する調査報告書, JNES-SS-0601, (2006).
- (7) 土肥謙次, “軽水炉压力容器鋼の小型シャルピー衝撃試験技術の開発,” 電力中央研究所研究年報 2000 年版, 2-3 (2000).
- (8) 大岡紀一, 石井敏満, “原子炉容器用鋼材の中性子照射脆化の評価,” 非破壊検査, 52 [5], 235-239 (2003).
- (9) 鎌田康寛, 高橋正氣, 荒克之, 菊池弘明, 小林悟, “圧延及び熱時効した FeCu モデル合金の脆化と磁気特性,” 日本保全学会第 2 回学術講演会要旨集, 173-174 (2005).
- (10) 中東重雄, 程衛英, 志波光晴, 古村一郎, 高橋則雄, 藤原耕二, “電磁気的手法による压力容器鋼 (SQV2A) の照射脆化度評価,” 技術レビュー, 2, 34-40 (2006).
- (11) M. Delnondedieu, J-F. Coste, H. Hegeman, et al., “GRETE project-Evaluation of non-destructive testing techniques for monitoring of material degradation,” *FISA2003 EU Research in*

- Reactor Safety*, Luxembourg, 10-13 November, (2003).
- (12) G. Dobmann, I. Altpeter, M. Kopp, "Nondes- tructive materials characterization of irradiated nuclear pressure-vessel steel samples by the use of micromagnetic techniques and in terms of mechanical properties," *Rus.J. Non- destr. Testing*, **42**[4], 272-277 (2006).
- (13) M. Delnondedieu, M. Houze, "Non destructive characterisation of RPV steel ageing parameters by thermoelectric power measurement," *Сборник докладов седьмой Российской конференции по реакторному материаловедению*, 8-12 September, (2003).
- (14) B. Acosta, L. Debarberis, A. Rito, "Advances in the development of the "STEAM" thermoelectric method for radiation embrittlement assessment," 4th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, London, December, (2004).
- (15) B. Acosta, F. Sevini, "Evaluation of irradiation damage effect by applying electric properties based techniques," *Nucl. Eng. Des.*, **229**, 165-173 (2004).
- (16) M. Niffenegger, K. Reichlin, D. Kalkhof, "The change of the seebeck coefficient due to neutron irradiation and thermal fatigue of nuclear reactor pressure vessel steel and its application to the monitoring of material degradation," *PSI Ber.*, **02-11** (2002).
- (17) 永井康介, 長谷川雅幸, 柳田誠也, 宝野和博, "圧力容器鋼モデル合金中の超微小 Cu 析出物の検出: 陽電子消滅と 3 次元アトムプローブ," *金属*, **73**[8], 53-56 (2003).
- (18) 鬼塚貴志, 蔵元英一, 永井康介, 長谷川雅幸, "低温電子線照射した Fe-Cu 合金中の Cu 析出物形成過程の陽電子消滅法および電気抵抗測定による研究," *KURRI-KR*, **5**, 8 (2004).
- (19) Q. Xu, "Fe 中の Cu 析出の中性子照射量依存性," *KURRI-KR*, **5**, 10 (2004).
- (20) 飛田徹, 相澤一也, 鈴木雅秀, 岩瀬彰宏, "電子線と中性子による Fe-Cu モデル合金の照射硬化," *日本原子力学会和文論文誌*, **3** [4], 331-339 (2004).
- (21) 蔵元英一, 鬼塚貴志, 永井康介, 長谷川雅幸, "Fe 中の Cu 析出過程における格子間原子の寄与に関する研究," *東北大学金属材料研究所研究部共同研究報告平成 16 年度*, 132 (2005).
- (22) S. Miloudi, S. Jumel, P. Pareige, J-F. Coste, J-C.V. Duysen, "Thermoelectric Power: A non-destructive method for monitoring irradiation effects in ferritic steels," *Proceedings of a Joint EC IAEA Specialists Meeting on NDT Methods for Monitoring Degradation*, Petten, The Netherlands, 10-12 Mar. (1999).
- (23) 河口恭寛, 岡野行光, "非破壊手法による製造 2 相ステンレス鋼の熱時効評価," *日本機械学会論文集*, **67A**[655], 462-469 (2001).
- (24) 河口恭寛, 山中伸介, "熱起電力法を用いた製造 2 相ステンレス鋼の熱時効による材料劣化の非破壊評価," *日本金属学会誌*, **66**[4], 377-383 (2002).
- (25) 河口恭寛, 山中伸介, "製造 2 相ステンレス鋼の熱時効に伴うフェライト相の Cr 濃度変調による熱起電力の変化," *日本金属学会誌*, **66**[8], 840-848 (2002).
- (26) Y. Kawaguchi, S. Yamanaka, "Applications of TEP measurement to deterioration diagnosis of nuclear material and its principle," *J. Nondestr. Eval.*, **23**[2], 65-76 (2004).
- (27) 石田仁志, 河口恭寛, "熱起電力法を用いた製造 2 相ステンレス鋼熱時効材のシャルピ衝撃値の評価," *INSS JOURNAL*, Vol. 10, p. 210 (2003).
- (28) 上坊寺克郎, "熱起電力法による製造 2 相ステンレス鋼の熱時効評価手法の原子力発電所実機適用性の検討," *INSS JOURNAL*, Vol. 13, p. 225 (2006).
- (29) D.M. Rowe, *CRC handbook of thermoelectrics*, CRC Press LLC, p.390 (1995).
- (30) J.F. Coste, J.M. Leborgne, J.P. Massoud, O. Grisot, S. Miloudi, R. Borrelly, "Application of thermoelectricity to NDE of thermally aged cast duplex stainless steels and neutron irradiated ferrite steels," *Proc. EPRI workshop on NDE of damage assessment*, La Jolla, USA, (1997).
- (31) 日本金属学会編, *金属データブック 改訂第 4 版*, 丸善, p.14 (2004).

- (32) 日本金属学会編, 金属データブック 改訂第4版, 丸善, p.131 (2004).
- (33) B. Acosta, L. Debarberis, S. Pirfo, et al., "WWER-1000 base metal reference steel and its characterisation," *Nucl. Eng. Des.*, **235**, 1951-1959 (2005).