

**G 相 (Ni<sub>16</sub>Si<sub>7</sub>Mn<sub>6</sub>) の物性測定と結晶構造解析：  
軽水炉压力容器の脆化寿命予測の高精度化に資する基礎研究**

Physical property measurements and crystallographic analysis of G-phase Ni<sub>16</sub>Si<sub>7</sub>Mn<sub>6</sub>:

A fundamental study for lifetime prediction of reactor pressure vessel steels  
undergoing irradiation-induced embrittlement

\*松川 義孝<sup>1</sup>, 山口 正剛<sup>2</sup>, 本間 佳哉<sup>1</sup>, 中森 文博<sup>3</sup> 牟田 浩明<sup>3</sup>,  
井藤 大智<sup>1</sup>, 大石 佑治<sup>3</sup>, 小林 能直<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東北大学・金研,<sup>2</sup>原子力研究開発機構,<sup>3</sup>大阪大学,<sup>4</sup>東京工業大学

原子炉压力容器鋼の照射脆化の引き金となる析出物“G相 (Ni<sub>16</sub>Si<sub>7</sub>Mn<sub>6</sub>)”のバルク材をアーク溶解で作成し、物性測定を行った結果について報告する。第一原理計算の結果と比較した結果についても言及する。

**キーワード：** 压力容器、脆化、析出物、物性、状態図

軽水炉の压力容器本体を構成する低合金鋼 (A533B など) の照射脆化の主な要因は、照射と長時間時効の相乗効果で生じるナノサイズの析出物である。運転開始直後の数年間は主に Cu が析出するが、30–40 年経過すると Cu はあらかた枯渇し、代わりに Ni と Mn、Si などが析出し始める[1]。この Ni-Mn-Si 析出物は、これまで長い間素性がわからず、便宜上 late-blooming phase と呼ばれてきたが、2013 年頃から、これは金属間化合物 G 相 (Ni<sub>16</sub>Si<sub>7</sub>Mn<sub>6</sub>) と考えるのが妥当であると指摘する報告が目立つようになってきた[2]。この最新の知見を考慮すると、压力容器の脆化寿命予測の精度を向上させるための具体的な指針の一つとして、G 相の析出メカニズムを明らかにし[3]、それを踏まえて析出の予測精度を向上させることが有効であると考えられる。そのためには、析出の熱力学的な駆動力を正確に評価することが必要不可欠であるが、現状では G 相の物性についての情報が乏しいため、計算結果の妥当性を検証することが困難である。本研究では、G 相そのものの単相インゴットをアーク溶解で作成し、融点や比熱、熱膨張係数、破壊靱性といった物性データを取得し、さらに自由エネルギーを実験で導出することを試みた。実験データを Thermo-calc などの状態図計算に反映させることが、本研究の最終的な目標である。Thermo-calc の既存のデータベース (TCFE8) で算出した G 相の融点は、実際の融点とは約 800 K も異なることが明らかとなった。また、G 相は非常に脆く、インゴットに少しでもクラックが入ると、素手でも簡単に割れてしまうことが明らかとなった。実験及び熱力学計算と並行して第一原理計算も行い、シミュレーションで実験データをどこまで正確に再現できるのかも評価した。G 相の単位胞を構成する原子の数は 116 もあり、さらに磁性の取り扱いにも配慮しなくてはならないため、大規模な第一原理計算が必要になる。今回の発表は、原子力学会における本研究プロジェクトの最初の報告であるため、主に概要と展望について紹介する予定である。

本発表の一部は科研費 (16K06767 と 17H03375) と ISIJ 鉄鋼助成金 (第 26 回) の成果である。

**参考文献**

- [1] Zinkle, S. J. & Was, G. S. *Acta Mater.* **61**, 735–758 (2013). [2] Sprouster, D. J. et al. *Scripta Mater.* **113**, 18–22 (2016).  
[3] Matsukawa, Y. et al. *Acta Mater.* **116**, 104–113 (2016).

\*Yoshitaka Matsukawa<sup>1</sup>, Masatake Yamaguchi<sup>2</sup>, Yoshiya Homma<sup>1</sup>, Fumihiro Nakamori<sup>3</sup>, Hiroaki Muta<sup>3</sup>, Daichi Ito<sup>1</sup>, Yuji Ohishi<sup>3</sup>, Yoshinao Kobayashi<sup>4</sup>; <sup>1</sup>Tohoku University, <sup>2</sup>Japan Atomic Energy Agency, <sup>3</sup>Osaka University, <sup>4</sup>Tokyo Institute of Technology