軽水炉圧力容器の寿命予測と延命処理ついて
（1）照射誘起析出物 G 相 $Ni_{16}Si_7Mn_6$

Prediction and Extension of Lifetime of Reactor Pressure Vessel

(1) Irradiation-induced Precipitate G-phase $Ni_{16}Si_7Mn_6$

*松川 義孝 [1]，渡邉 大樹 [1]，連川 貞弘 [1]，Nina M. Abad[1]，
牟田 浩明 [2]，吉田 健太 [3]，笠田 竜太 [3]，山口 正剛 [4]，熊野 秀樹 [5]，遠藤 美奈子 [5]
[1] 熊本大学，[2] 大阪大学，[3] 東北大学，[4]JAEA，[5] 中部電力

The G-phase $Ni_{16}Si_7Mn_6$ is a possible form of the so-called irradiation-induced late-blooming phase in the reactor pressure vessel steel, causing materials embrittlement. Its dissolution behavior in the bcc-Fe under thermal annealing has been investigated by means of diffusion couple technique.

キーワード： 軽水炉，圧力容器，脆化，予測式，析出物，化合物，再固溶，延命，アニーリング

軽水炉を 80 年近くまで運転し続けた場合、G 相や Γ_2 相といった Ni-Si-Mn 三元系金属間化合物が圧力容器鋼に析出し、それが照射脆化に寄与すると現在一般に考えられている。その可能性が最初に指摘されたのは 2015 年前後であるため、この知見は現行の脆化予測式 JEAC4201-2013 には反映されていない。析出する元素として現在考慮されているのは Cu と Ni のみである。このままでは三元系の析出物を再現できないが、これについては Si と Mn を考慮すれば一応解決するという意味で、それほど難易度が高い問題ではない。学術的な観点から考えた場合、最も深刻な問題は化合物の核形成理論そのものが未だ確立していないことである。具体的には、JEAC4201 のように原子の拡散に着目したモデルにおいては、各元素の拡散係数の大小が化合物の化学量論組成と一致していないという事実を、核形成の臨界条件にどのように結びつけるかが問題である。拡散係数の大小は $D_{Si} \fallingdotseq D_{Mn} > D_{Ni}$ であるが、化学量論組成は G 相が $Ni_{16}Si_7Mn_6$、Γ_2 相が Ni_3SiMn_2 であり、三元系化合物はこの他にも複数ある。

この問題を解明するためには、析出物とマトリックスの界面における相互拡散挙動を精密に調査する必要があるが、析出物はナノサイズであるため、最新の透過型電子顕微鏡やアトムプローブを駆使しても分析は容易ではない。本研究では、析出物 / マトリックス界面を模擬した拡散対を作製し、析出物（G 相）が熱的に分解してマトリックス（bcc 鉄）に固溶していく拡散過程について、EPMA を用いて精密に調査した。本研究では核形成の過程そのものを調査している訳ではないが、化学反応速度論という観点で考えると、核形成と熱分解は正反応と逆反応という対応関係になっている。分析の結果、三元素は G 相の化学量論組成の比を保ったまま固溶していくことが明らかとなった。その際の拡散係数は、拡散データベースに記載されている（稀薄合金における）バルク拡散係数より 1~2 桁程度大きかった。さらに、この拡散係数が変化するという現象が起こる範囲はかなり広く、界面から 20 μm 程度離れていても起こることが明らかとなった。実機材の圧力容器鋼におけるナノ析出物の数密度は 10^{21} /m^3 のオーダーであり、これは析出物の粒子間隔が<100 nm に相当する。析出する際には、拡散係数が実質的に最初から熱力学の影響によって変化している可能性がある。

This work has been supported by the ZE Research Program, IAE, Kyoto Univ. (ZE2023A-07), also by the GIMRT Program, IMR, Tohoku Univ. (202212-CRKKE-0017, 202212-RDKGE-0021, & 202212-IRKMA-0030), and by Chubu Electric Power Co., Inc.

*Yoshitaka Matsukawa[1], Daiki Watanabe[1], Sadahiro Tsurekawa[1], Nina M. Abad[1], Hiroaki Muta[2], Kenta Yoshida[3], Ryuta Kasada[3], Masatake Yamaguchi[4], Hideki Yuya[5] and Minako Endou[5]

[1]Kumamoto Univ., [2]Osaka Univ., [3]Tohoku Univ., [4]JAEA, [5]Chubu Electric Power