

材料損傷機構の実験および理論による包括的研究と 高エネルギー量子ビーム場用材料開発

Comprehensive study on material damage mechanism
by experimental and theoretical methods and development of
materials for high-energy quantum-beam fields

川合 将義 (KAWAI Masayoshi)

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・名誉教授



研究の概要

J-PARC で代表される高エネルギー陽子等の量子ビーム場に置かれた材料は、強烈な熱衝撃や放射線損傷を受ける。その損傷の現象を実験的に調べ、また理論的に解析して機構を明らかにする。また、それらの損傷に対して強い材料を開発して、その特性を評価し、もって、核破砕中性子源の標的の寿命延伸に寄与する。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：陽子、中性子源、放射線損傷、衝撃損傷、材料開発

1. 研究開始当初の背景・動機

J-PARC の建設が進み、核破砕中性子源である水銀標的の製作が進んでいた。しかるに陽子ビームパルス入射の熱衝撃によって水銀標的の容器にピitting損傷が生ずるといふ緊急問題が判明した。また、長寿命核消滅用の標的では、長期運転に伴う放射線損傷が原子炉以上に甚大であることが分かり、その評価法が重視されるに至った。そこで上記問題に対応した強い材料や損傷緩和法の開発の必要性が認識された。

2. 研究の目的

大強度の高エネルギー量子場における衝撃損傷ならびに原子炉や核融合炉より生成が多い2次粒子を含めた放射線損傷の機構を実験的に調べ、その理論評価法を開発する。さらにそれらの衝撃を緩和するシステムや材料を開発する。

3. 研究の方法

衝撃損傷と放射線損傷機構の解明のために北大のマルチビーム照射施設にレーザを組み込み、損傷シミュレーション実験と材料開発基礎試験を行う。また、核破砕場として代表的なスイスのポールシェラー研究所のSINQで照射された材料の機械特性等を測定し、放射線損傷を調べる。水銀標的の損傷は、JAEAの電磁式衝撃試験装置と超高速カメラを用いて損傷機構を究める。その結果をもとに衝撃緩和システムや材料の開発を行う。さらに、機械的合金化や粒界工学等の最新の材料処理技術および照射損傷のシミュレーションを用いて放射線と衝撃に強い材料を開発し、評価する。

4. これまでの成果

(1) 衝撃損傷評価

水銀標的のピitting損傷の機構とその抑制のためのヘリウムバブル注入が実際に利くこと、そして如何に利くかを実験的に明らかにした。図1に代表的な結果を示す。衝撃後内圧が -0.15 MPa 以下になった 0.4 ms で水銀バブルが発生し、 1.2 ms 以降バブルが消えるとともにマイクロジェット発生に伴う加速度と圧力の鋭いピークと圧力が発生している。この時ピitting損傷が起きている。解析によればマイクロジェットの与える局所的な衝撃力は 1 GPa にも及ぶ。一方、ヘリウムバブルを注入すると、内圧が水銀バブル発生の際とも考えられる -0.15 MPa には下ならず、ピittingの恐れがなくなる。

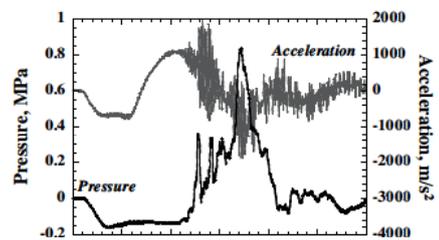


図1 衝撃後の内圧と加速度の変化

(2) 材料開発

核破砕中性子源の3大要素の標的材、構造材、窓材について、破壊靱性 $350\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上、 10dpa 以上の耐放射線損傷特性を目標にして、より革新的な材料を開発した。

構造材として代表的なオーステナイト系ステンレス鋼やニッケル合金のようなオーステナイト系材料は、粒界劣化現象の克服が大きな課題である。低エネルギー粒界(対応粒界)が粒界劣化現象に対して強い抵抗性を有することに着目し、材料中の対応粒界密度を高めることによって粒界に起因する劣化現象を抑制する粒界工学を、市販の304, 304L, 316, 316L オーステナイト系ステンレス鋼に適用し、85%以上の極めて高い対応粒界密度を有する超高対応粒界密度(粒界工学制御)材料の作製に成功した。得られた材料はいずれも、鋭敏化条件で熱処理、硫酸・硫酸第二鉄腐食試験で、初期母材に比べて4倍以上も高い耐粒界腐食抵抗性を示した。この性質が溶接の高温条件を経ても保持できることを確かめた。

固体標的の最有力材のタングステンにTiCを微量添加して高靱性の超微細粒結晶を開発した。超塑性の利用による高温塑性加工の実施により、室温で曲げ延性を示すと共に放射線損傷にも強さが期待できるタングステンが実現できた。

カーボンナノチューブの引張強度と熱伝導度が非常に優れている点に着目し、カーボンナノチューブとアルミナとの複合材の開発に成功した。即ちカーボンナノチューブ混合割合2.5-15%の材料と、さらに混合割合を空間的に変化させた傾斜材料を開発できた。この材料は、ADS標的の窓材としての利用が想定され、今後特性を調べる。

(3) 放射線損傷実験

放射化のため国内持ち込みができなかった照射試料の測定のため、スイスのポールシェラー研究所に研究員と機材を送り込み、同所の核破砕中性子源場での照射実験(STIP実験)で照射した材料の機械特性および材料組織観察を行った。測定内容は、核破砕中性子源の候補材であるAu合金及びPt合金の陽子照射による機械的強度特性のである。また、東海ホット施設でオーステナイト鋼JPCAのスエリング量評価を得た。粒界制御処理した各種のオーステナイト鋼を対象に、北大のマルチビーム照射施設にて電子線照射試験を行い、照射前後の微細組織変化をTEM観察した。またイオン加速器によるHeイオン照射実験も併せて行い、粒界近傍における偏析挙動を調査し、対応粒界では偏析が十分に抑制されることを明らかにし、粒界制御材がIASCCを抑制できる見込みを得た。

(4) 照射損傷の理論的解析：コードシステムの開発

高エネルギー粒子の照射による核反応過程から材料のマクロ的な性質の変化まで追う材料損傷の評価コードシステムの作成を目指し、所用モジュールの作成を行った。

核反応過程後の非経験的手法により欠陥や欠陥と添加元素、核反応で生成したガス元素との相互作用やその安定な構造を知ることができる第一原理計算コード、点欠陥の空間分布を作る分子動力学コード、カスケードで生成した点欠陥の集合体形成を扱うキネティックモンテカルロ法コード、損傷構造発達過程を解析するための反応速度論コード、材料の機械的特性を予測する離散化転位動力学(DDD)計算コードを開発した。

5. これまでの進捗状況と今後の計画

この2年間でほぼ予定通りの成果を得た。特に材料開発においては、夫々異なる方法であるが、目的の性能を有する材料の開発ができた。この他にも微小粒界ステンレス鋼の開発も進めている。今後、開発した材料の特性を評価して、さらなる改良を行い、また実用化を目指す。放射線損傷の機構解明は、レーザも含めたマルチビームでのシミュレーション実験を行い、PSI実験の結果も含めて総合的に検討する。また、シミュレーションコードを完成し、実験解析を通じてモデルパラメータ等のデータベースを構築し、今後の材料の放射線損傷の寿命評価に役立てる。

6. これまでの発表論文等

- 1) Masatoshi Futakawa, Takashi Naoea and Masayoshi Kawai, Mercury Cavitation Phenomenon in Pulsed Spallation Neutron Sources, Proc. of 18th Int. Symposium on Nonlinear Acoustics, Stockholm, 7-10 July 2008, 197-200, AIP Conf. Proceedings 1022 (2008).
- 2) S. Yang, H. Kokawa *et. al.*, Journal of Materials Science, 42(2007)847-853 (粒界工学制御ステンレス鋼の開発)
- 3) H. Kurishita, M. Kawai, *et. al.*, Advanced Materials Research, 59(2009)18-30 (高靱性タングステンの開発)
- 4) Mehdi Estili and Akira Kawasaki, An approach to mass-producing individually alumina-decorated multi-walled carbon nanotubes with optimized and controlled compositions, Scripta Materialia 58 (2008) 906-909

Awards : Scripta Materialia has been

selected as one of the 25 hottest articles in April-June 2008 period

- 5) T. Yoshiie, K. Kikuchi, M. Kawai *et. al.*, Journal of Nuclear Materials 377 (2008) 132-135. (反応速度論とADS窓損傷評価例)
- 6) 渡辺精一, 粉川博之, 川合将義, 他, オーステナイト系ステンレス鋼における照射効果ならびに腐食挙動に及ぼす粒界性質依存性, 日本金属学会, 2009年3月31日, 「第12回優秀ポスター賞」受賞

ホームページ等

<http://research.kek.jp/group/newmaterial/s/index.html>