

保全工学から見た破壊力学健全性評価

Roles of Fracture Mechanics and Structural Integrity in Maintenance Engineering

(財) 電力中央研究所 鹿島 光一 Koichi KASHIMA Member

Abstract Structural integrity and flaw evaluation for nuclear power plant components has been recently introduced in Japan as the part of Fitness-for-Service Code. Flaw evaluation based on fracture mechanics approach leads to the establishment of a new perspective in the maintenance engineering for inspection, repair and replacement of nuclear components. The present paper describes the significance of the roles of fracture mechanics in maintenance engineering, including the aspects of future development of the maintenance science.

Keywords: Maintenance, Fitness-for-Service Code, Fracture Mechanics, Structural Integrity, Repair and Replacement
E-mail: kashima@criepi.denken.or.jp

1. はじめに

昨年 10 月、原子力プラントの新たな検査制度が国によって施行され、この一環として欠陥評価を含む健全性評価（維持規格）が制度化された。健全性評価は、破壊力学等を用いた欠陥評価によって、機器の適切な保全策を選定する新しい考え方を導入しており、保全工学に与える影響は大きなものがある。ここでは、保全工学と維持規格との関係、破壊力学による欠陥評価との関係などを改めて見直し、その本質的な意味合いについて検討を試みるとともに、保全工学の将来的な展開に向け、私見を交えつつ考察した結果を以下に示す。

2. 保全工学と維持規格

保全には、技術的、経済的、社会的、あるいは法的な側面など極めて多様な内容が含まれるが、狭義としての原子力発電プラントにおける保全は、発電機器が本来有する諸機能を十全に発揮させ得る状態を保つための補修・取替え等に加え、それを支援する検査等などを含めた一連の行為として捉えることができる。これに関連して、昨年 10 月より国の新たな検査制度の一環として、健全性評価が電気事業者に義務

図けられるようになった。この健全性評価においては、日本機械学会で策定された維持規格が引用されている[1]。同規格は、「検査」、「評価」、及び今後規格化が予定されている「補修・取替え」の 3 本柱について、規格面からの体系化を目指すものである(図 1)。これより、保全行為の一部として、機器の維持管理に関する位置付けが明確化されつつある。

保全にかかわる行為は、検査あるいは補修・取替えの例でもわかるように、現場における個別的なノウハウの経験を集積したものを基盤としており、定量的予見性を有する理論的・体系的な工学として構築することは、極めて困難な場合が多い。保全には「事後保全」と「予防保全」とがある。このうち「事後保全」は、損傷などを検知することによって、保全を必要とする機器が特定された後に保全を行うものであり、予見性には欠けるが効果的な保全が可能となる。一方、「予防保全」は、これまでの経験から、将来保全が必要となる機器、損傷形態を予想してあらかじめ対策を行う保全であるが、不確定要素が大きい場合には、必ずしも効果的な保全とはなりえない場合がある。維持規格によって、部分的にも保全を体系化しようとする枠組みができたことは、同規格に関わる多くの技術的課題を「保全工学」の一部として工

学的観点から再構築しようとする機運を生じさせるまたとない契機となりつつある。維持規格では、検出された欠陥に対して、保全（補修・取替え）の必要性の有無を材料レベルの問題にまでさかのぼって扱うことにより、欠陥によって引き起こされる損傷に関わる構造機器の健全性を定量的に予見し、これを検査や補修・取替えと関連付けて、合理的な保全を達成するプロセスが導入される。言い換えれば、「事後保全的」な情報（欠陥検出情報）をベースとして、不確定要素を少なくした上で、「予防保全的」措置のオプション（継続運転か、補修・取替えか）を的確に定める手法であるということが出来る。このように、維持規格における健全性評価の枠組みが構築される中で、保全と材料問題との関係が明確にされ、この中で保全工学としての位置付けが例示されることの意味合いは大きいものと考えられる。

3. 保全における破壊力学の役割

維持規格では、検査によって欠陥が検出された場合、一定の評価期間における欠陥の進展挙動を予測し、破壊を引き起こす可能性のある進展性の大きい欠陥については、機器の補修・取替えが要求される一方、進展性が小さく、評価期間内に破壊の可能性がないと判断される場合には、継続運転が認められる。

従来は、欠陥が検出された時点で機器の健全性が損なわれるといった考え方が取られたのに対し、維持規格では欠陥評価に基づいて欠陥の進展・破壊挙動を定量的に予見し、健全性の判定を下す点が従来とは大きく異なっている。この欠陥挙動の定量化を可能とする手法のひとつが破壊力学による欠陥評価手法である。

図2は、欠陥の挙動を示すためによく使われる概念図である。欠陥（割れ）の大きさ（縦軸）と時間（横軸）との関係の中で、欠陥は発生、進展した後、一定の限界値（限界欠陥寸法）に達した時点で、構造機器としての破壊が生じ、すなわち保全すべき対象となる。従って、機器は欠陥検出の時点で寿命に達したと見なされるのではなく、限界欠陥に達する時点までを寿命と考えることができる。もしも、欠陥検出時点を寿命に到達した

と見なすのであれば、非破壊検査精度の向上と共に、機器の寿命が低下するといったはなはだしい矛盾を抱えることになる。ただし、実際には、限界欠陥に安全率を見込んで定められる限界値（許容欠陥）に基づく寿命を考え、安全側の評価が可能となるように定められる。こうした考え方の背景には、（1）原子力機器は、低温脆性破壊のように、欠陥発生と同時に、瞬時に構造物全体が破壊するに至るような材料や環境の条件には置かれていないこと、さらに（2）原子力機器で使われる材料や環境において発生する欠陥は、これまでの経験から、疲労き裂や応力腐食割れのように、時間的に極めて緩慢な進展挙動（安定なき裂進展）を示すことが明らかとなっていることがある。欠陥評価は、必然的に「欠陥の許容性」といった概念を持ち込んでおり、欠陥を排除するといった従来の保全の考え方とは異なるため、インパクトのある見方もなされているが、その考え方は、構造強度としての視点から見れば極めて普遍的な考え方に根ざしている。

破壊力学は、上記に示すような欠陥の進展と破壊の問題を、限られた範囲ではあるが、破壊力学パラメータを介して定量的に扱うことができる有力な手法として確立されている。このようにして評価される欠陥の挙動は、最適な保全を実現するための有効な知見を提供する。すなわち、欠陥評価を行うことは、単に欠陥の挙動を予見するのみならず、機器の破壊に対する時間的・空間的裕度を明確に示すことを可能とする。これより、検査や補修・取替えの時期と範囲などについて、的確な保全策を定めることにもつながり、こうした点を認識することは極めて重要な視点である。

4. 保全工学の展開

以上述べたことから、健全性評価、欠陥評価の本質を考えると、欠陥検出といった一次情報を的確に把握することによって、将来の構造健全性の程度（進展、破壊）に関する二次情報を予見し、これに基づいて、最適な保全を選択することにつながっていくことが理解される。

現在の欠陥評価における破壊力学の適用は、

疲労き裂や応力腐食割れのような一部の欠陥（き裂状欠陥）にのみ可能となっている。欠陥評価の適用範囲を今後拡大していくためには、各種の非き裂状欠陥（例えば腐食・浸食などの欠陥）に対する手法についても上記に示した評価の本質に基づき、新たな手法を構築することが必要であろう。

一方で、近年の材料科学における発展は、ナノテクノロジーに端的に見られるように、微細な領域における物性を解明する技術において、目を見張るものがある。材料の損傷につながる微細な物性の変化の兆候を確実に捉えることができるならば、こうした情報も検査による欠陥検出情報と同様に、一次情報として有効活用できることとなる。検査情報は、一次情報のひとつであるといった認識を持って、保全技術の一層の開発が進むことが期待される。

材料の損傷は、究極的には、原子レベルでのミクロな挙動がベースとなるが、これを保全行為に結びつけるためには、当然マクロな挙動で記述できることが不可欠となる。破壊力学は現状におけるそうした手法の一つである。こうした取り組みの一例として、圧力容器の中性子照射脆化に関する研究を示す。同研究では、格子欠陥の挙動をベースとしてまさに原子レベルでの挙動を基に、マクロな脆化予測モデルを開発する試みが世界的に進められており、靱性評価の基盤を従来の経験的手法からメカニカルベースの手法に移行させていこうとする動きが見られる。ここで、特徴的なのは、マルチスケールといった概念を導入していることであり、ナノスケールの時空間と通常の時空間とを、段階的に複数の尺度でつなぎ合わせることで、ナノレベルの物質挙動をマクロな材料挙動として説明するような試みがなされている。こうした手法が、一般的な保全の世界に供されるのであれば、ミクロな損傷挙動とマクロな補修とをつなぐ新たな保全のアプローチが達成されるのも夢ではない。しかしながら、原子力機器の置かれている複雑な条件のもとでは、こうしたアプローチが一般化されるには、まだまだ多くの時間が必要とされることは言うまでもない。

その意味で、保全工学の今後の展開をにらん

で、「より高度な一次情報」を取り入れた保全技術として、「保全科学」の構築をも視野に入れた今後の技術開発に期待したい。

5. まとめ

- (1) 保全は、従来、経験的なノウハウをベースとしており、体系的な保全工学としての取り組みが困難であった。
- (2) 維持規格の導入は、検査、評価、補修・取替えの3つの柱を中心として、保全行為の一部を体系化し、保全工学を構築する契機のひとつとなりつつある。
- (3) 維持規格における欠陥評価によって、機器の破損に対する裕度を定量的に予見することが可能となり、これに基づいて有効な保全策が選定され、保全の合理化に反映させることができる。
- (4) 健全性評価の本質は、材料の一次情報をベースとして、保全にかかわる二次情報を的確に予見することである。この考え方によれば、欠陥検査の情報は一次情報のひとつであり、損傷につながる物性情報を広く一次情報として捉えることができる。
- (5) これを実現させるため、保全工学の将来として、保全科学の役割が今後期待される。

参考文献

- [1] 日本機械学会：発電用原子力設備規格維持規格（2002年改訂版）、JSME S-NA1-2002、2002年。

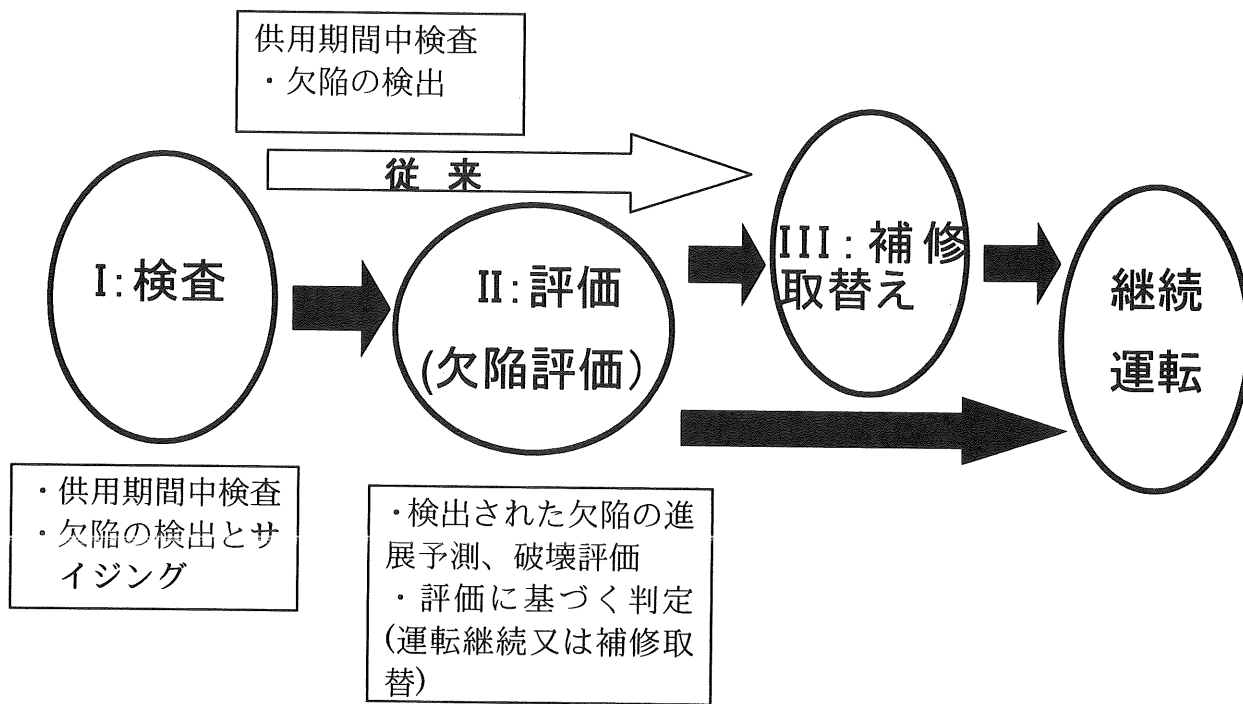


図1 維持規格の3つの柱

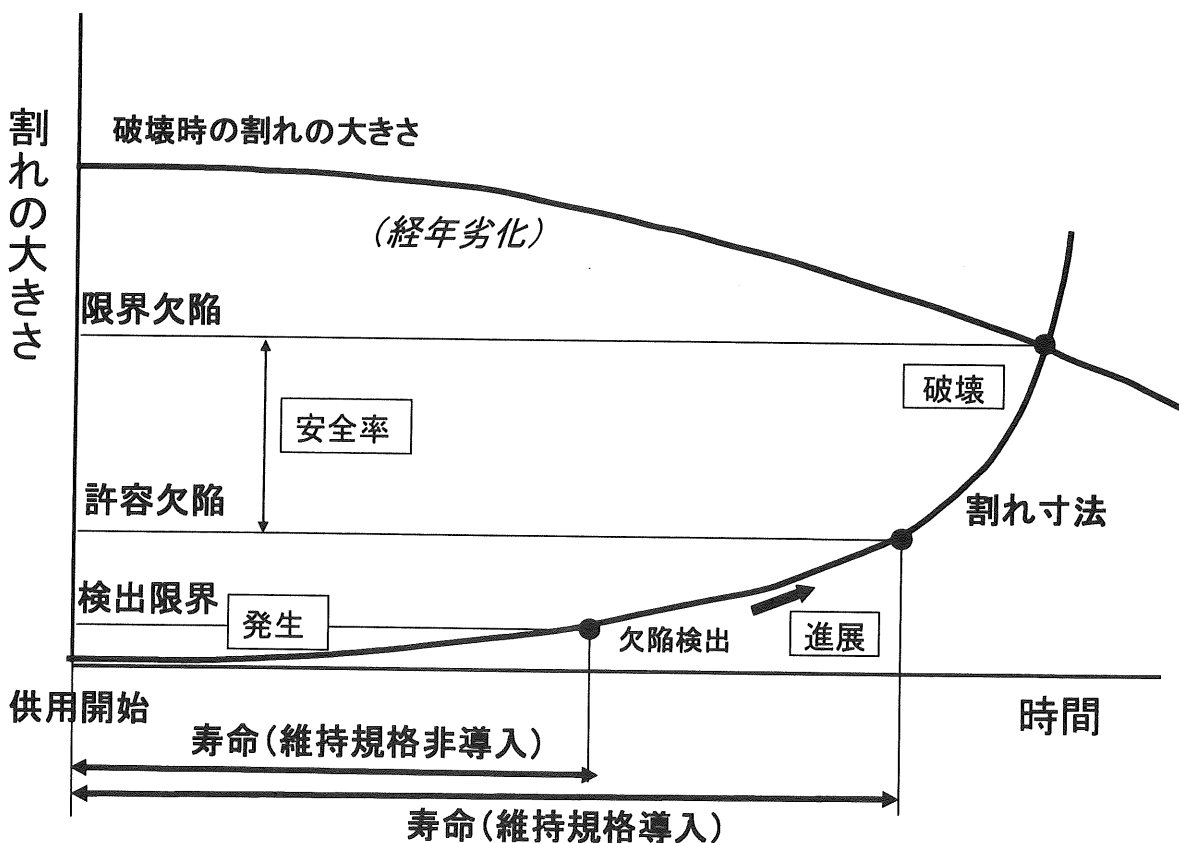


図2 欠陥評価と寿命