

使用済燃料貯蔵キャスクの長期密封性能

加藤 治*, 三枝利有**

既報[1-4]により, アルミニウム被覆の金属ガスケット及び銀被覆の金属ガスケットの密封性寿命を加速試験及びラーソン・ミラー法により, 各々190年, 10^3 年以上と評価した。本研究では, 貯蔵キャスクの長期密封性能を確認するため, 各種貯蔵キャスクの中から, キャスクの密封性能に直接影響する蓋部の形状, シール溝及びガスケットの密封構造に着目して選定した2種類の実物大キャスク蓋部モデルを用いた長期密封性能試験を実施中である。本試験は, 平成2年10月に開始し, 現在まで約9年継続実施しているものである。

また, キャスクが保管される建屋内の雰囲気温度は, 当然のことながら, 季節変化に伴い変動し, キャスクの温度にも影響を及ぼす。このため, 貯蔵環境温度の季節変化のキャスク密封性能への影響の有無を確認する必要がある。このような繰り返しのある温度変動下においては, 主として, 金属ガスケットのコイルスプリングのサイクルクリープ性能が問題となるものと考えられる。サイクルクリープ性能に影響する因子としては, 繰り返し数, 温度, 繰り返し速度等がある。これらを考慮して, キャスク蓋部縮尺モデルを用いた温度サイクル試験を実施し, 温度変動の密封性能への影響を検討した。

Keywords: 使用済燃料, 貯蔵キャスク, 長期密封性能, 金属ガスケット

Previous papers[1-4] reported that the performance life of metallic gaskets coated with aluminum or silver will be more than 190 years, respectively, based on an accelerated tests and Larson-Miller's estimation method. This paper describes demonstrative tests on long-term containment of full-scale cask lid models. The cask models were selected from various types of storage casks, taking account of the influential structure such as lid shape, gasket groove, and gasket structure. The tests have continued from 1990 for more than 9 years. In addition, it was noted that the casks experience temperature variation of seasons in the storage building. It will be necessary to confirm any influence of such environmental temperature variation, on the containment performance of the casks. Primary, a cyclic creep characteristics should be investigated. Factors for the cyclic creep will be number of cycles, temperature, velocity of cycle, etc. Taking account of those factors, temperature-cyclic tests were carried out to investigate the effect on the containment of the cask.

Keywords: spent fuel, storage cask, containment performance, metallic gasket

1 はじめに

既報[1-4]により, アルミニウム被覆の金属ガスケット及び銀被覆の金属ガスケットの密封性寿命を加速試験及びラーソン・ミラー法により, 各々190年, 10^3 年以上と評価した。本研究では, 貯蔵キャスクの長期密封性能を確認するため, 各種貯蔵キャスクの中から, キャスクの密封性能に直接影響する蓋部の形状, シール溝及びガスケットの密封構造に着目して選定した2種類の実物大キャスク蓋部モデルを用いた長期密封性能試験を実施中である。本試験は, 平成2年10月に開始し, 現在まで約9年継続実施しているものである。また, キャスクが保管される建屋内の雰囲気温度は, 当然のことながら, 季節変化に伴い変動し, キャスクの温度にも影響を及ぼす。このため, 貯蔵環境温度の季節変化のキャスク密封性能への影響の有無を確認する必要がある。このような繰り返しのある温度変動下においては, 主として, 金属ガスケットのコイルスプリングのサイクルクリープ性能が問題となるものと考えられる。サイクルクリープ性能に影響する因子としては, 繰り返し数, 温度, 繰り返し速度等が

ある。これらを考慮して, キャスク蓋部縮尺モデルを用いた温度サイクル試験を実施し, 温度変動の密封性能への影響を検討した。

2 長期密封性能の確認

貯蔵キャスクの長期密封性能を確認するため, 各種貯蔵キャスクの中から, キャスクの密封性能に直接影響する蓋部の形状, シール溝及びガスケットの密封構造に着目して選定した2種類の実物大キャスク蓋部モデルを用いた長期密封性能試験を実施中である[5-8]。

2.1 試験方法

試験に用いたモデルは, Fig.1 に示す 型モデル(例: TN24)及び 型モデル(例: CASTOR)の2種類のモデルである。型モデルは, 胴部及び蓋は鍛造炭素鋼製であり, シール面はステンレス鋼(SUS 304)の肉盛り溶接を施したものである。また, 一次蓋及び二次蓋のガスケットには二重の金属ガスケット(アルミニウム被覆)を採用している。一方, 型モデルは, 胴部は球状黒鉛鋳鉄製, 蓋はステンレス鋼製であり, 胴部のシール面にはニッケルメッキを施したものである。また, 一次蓋及び二次蓋の内側ガスケットには金属ガスケット(銀被覆), 外側ガスケットにはゴムガスケット(シリコンゴム)を採用している。

Long-term containment performance of storage cask for spent fuel, by Osamu Kato (o-kato@criepi.denken.or.jp), Toshiari Saegusa

* (財)電力中央研究所 我孫子研究所 構造部 Structure Department, Abiko Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Industry 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646

** (財)電力中央研究所 我孫子研究所 リサイクル燃料貯蔵技術課題推進担当 Director of Spent Fuel Storage Project, Abiko Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Industry 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646

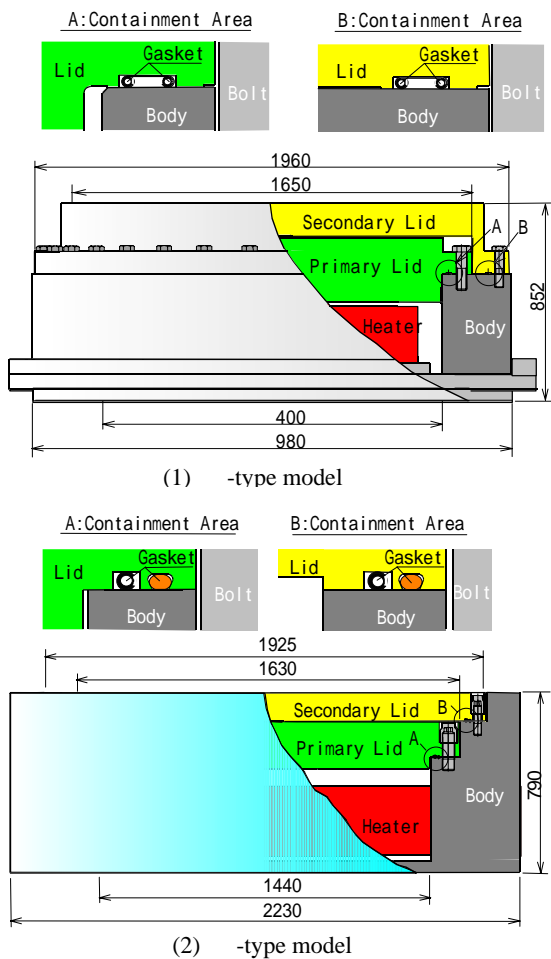


Fig.1 Detail of test models

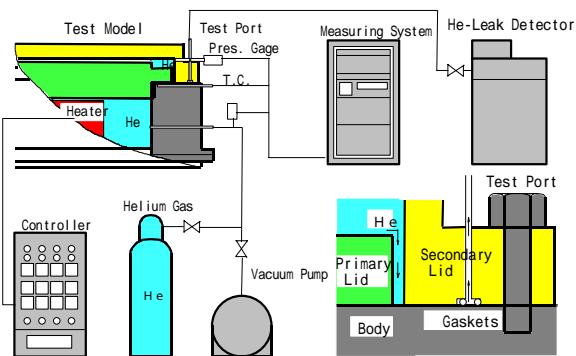


Fig.2 Outline of the long-term containment performance test

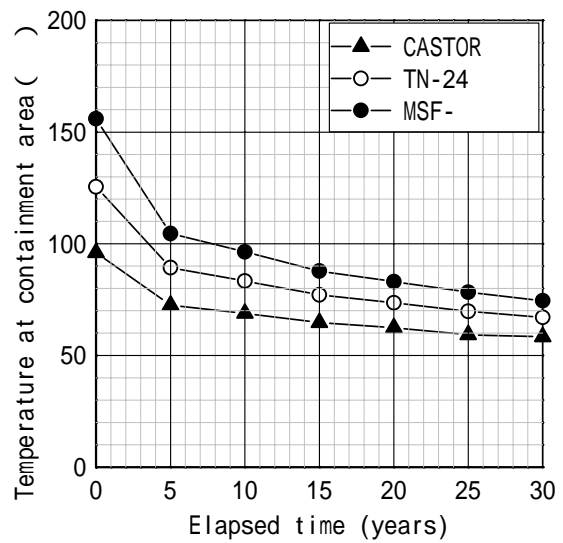


Fig.3 Analytical result on history of temperature at containment area

本試験の概要を Fig.2 に示す．モデル内部に設置したヒータにより、貯蔵時に想定される温度を保持し、定期的にヘリウムリーク試験を実施してモデルの密封性能を測定した．

2.2 試験条件

貯蔵時のキャスク温度を推定するため、ORIGEN 2 コードを用いて、燃焼度及び冷却年数などから崩壊熱の経年変化を算出した後、ABAQUS コードによる伝熱解析を実施した．この結果を Fig.3 に示す．

本試験における試験温度は、この貯蔵時温度解析で得られた最高温度（156 °C）に基づいて決定したものであり、一次蓋ガスケット部の温度を 160 °C 一定として制御した．キャビティー内には、熱平衡時に 0.8 気圧となるように、ヘリウムガスを充填し、一次蓋と二次蓋の空間は、型モデルが 4 気圧、型モデルが 6 気圧でヘリウムガスを充填した．これらの圧力条件は、実キャスクと同様である．

2.3 試験結果

試験開始から平成 12 年 3 月末現在までの温度と漏洩率の経時変化を Fig.4 及び Fig.5 に示す．これらで示すように、環境温度（実験棟内）の季節変動（約 38 ~ 10 °C）で二次蓋ガスケット温度は、夏と冬で 6 °C（型モデル）~ 10 °C（型モデル）程度の温度変動が認められた．また、試験開始から約 9 年が経過したが、二次蓋密封部の漏洩率の変化はなく、いずれのモデルも試験開始時の良好な密封性能を保持していることが確認された．

安全設計上、キャスクに必要な密封機能とは、周辺公衆及び放射線業務従事者に対し、放射線被曝上の影響を及ぼすことのないよう、使用済燃料が内包する放射性物質を適

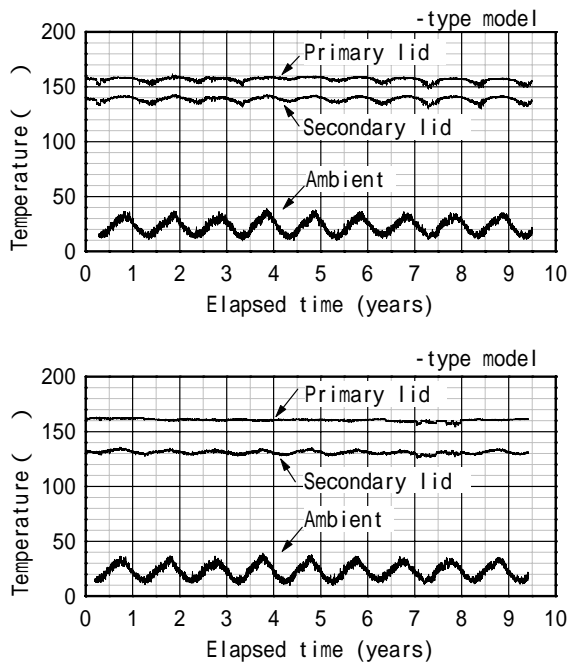


Fig.4 History of temperature

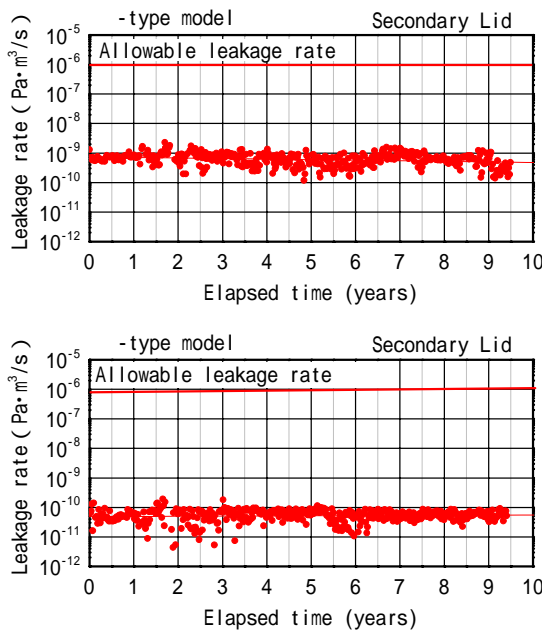


Fig.5 History of leakage rate

切に閉じ込めることである。このため、カスク内部の放射性物質の外部への漏洩を実質的に無視し得るよう、設計貯蔵期間中、カスク内部の負圧を維持する設計とされており、この漏洩率が基準漏洩率 ($1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) である [9,10]。

したがって、実寸モデルの長期密封性能試験で得られた漏洩率は、 $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ オーダー以下であり、基準漏洩率の 2~3 オーダー程度小さく、カスクの密封性能が約 9 年にわたり健全であることが確認できた。なお、これらは

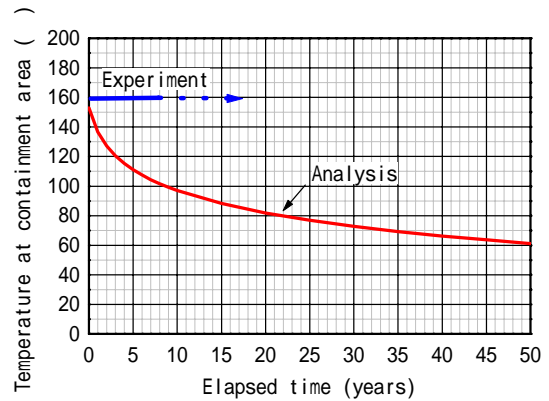


Fig.6 Comparison between analysis and experiment on history of temperature at containment area during storage

貯蔵時の健全性について述べたものであり、貯蔵後の輸送時の密封健全性評価については今後の課題と考えられる。

2.4 試験結果の評価

以上の長期密封性能試験は、試験開始から一定温度 (160) で実施したものである。これに対し、実際の貯蔵時においては、Fig.6 に示すように、使用済燃料の崩壊熱の経年変化に伴い、カスク温度は時間とともに低下する。したがって、試験は実貯蔵時よりも厳しい温度条件であり、加速試験となっているものと考えられる。

そこで、これらの温度履歴を考慮しラーソン・ミラー・パラメータ(LMP)を適用し試験の加速の程度を以下のとおり試算した。LMP は、

$$LMP = T(C + \log t) \tag{1}$$

ここで、 T : 温度(K), C : 定数, t : 時間(h)

で表される [11-13]。そこで、長期密封性能試験の場合には、温度 $T = \text{一定}(433 \text{ K})$ であり、 $LMP = T(20 + \log t)$ とする。また、実貯蔵時の場合には、密封部温度が時間とともに減少するため、温度を時間の関数で表して、 $LMP = T(t)(20 + \log t)$ として、両者の LMP の時間変化を求めた。

3 環境温度変化の影響

カスクが保管される建屋内の雰囲気温度は、当然のことながら、季節変化に伴い変動し、カスクの温度にも影響を及ぼす。このため、貯蔵環境温度の季節変化のカスク密封性能への影響の有無を確認する必要がある。このような繰り返しのある温度変動下においては、実機カスクの蓋と本体胴で異種材料が用いられており、両者の熱膨張差によるガスケット部のズレの発生が考えられるが、温度の変化速度が約 50 /0.5 年程度と遅いため、この密封性能への影響は小さく、主として、金属ガスケットのコイルスプリングの熱疲労強度が問題となるものと考えられる。熱疲労強度に影響する因子としては、繰り返し数、温度、繰り返し速度等がある [14]。これらを考慮して、

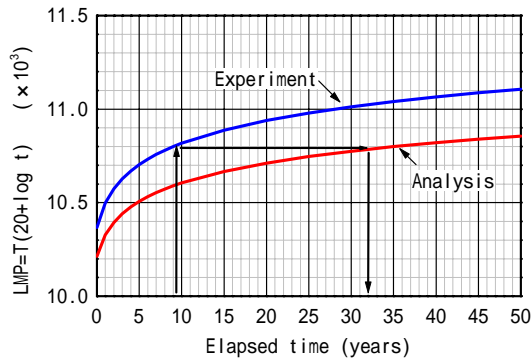


Fig.7 Estimation of long-term containment performance during storage, by experiment and analysis



Fig.8 Heat cycle test apparatus

キャスク蓋部縮尺モデルを用いた Fig.8 に示す温度サイクル試験を実施し、温度変動の密封性能への影響を検討した。

この結果を Fig.7 に示す。同図の試験の LMP 曲線において、時間が9年のときの LMP の値は 10.8×10^3 である。これと一致する実貯蔵の時間は約 32 年である。

以上から、平成 12 年 3 月までに実施した約 9 年間の長期密封性能試験で、実貯蔵時の約 30 年に相当する密封性能の健全性が確認できたものと推察される。

LMP による外挿については、その精度等に問題があるとの指摘があるが、金属材料のクリープ破断寿命評価の分野では、データの外挿に際して、使用期間が試験期間の 10 倍以内とするなどの制限を設けて、LMP などの時間・温度パラメータが適用されている。したがって、本試験の場合、現時点で約 4 倍程度の外挿であり、この制限範囲内といえる。外挿の精度向上には、さらに、長期試験の継続実施が必要と考えられる。

また、型モデルに採用されているエラストマー・ガスケットの9年の密封性能の健全性も同時に確認されたものと考えられるが、さらに長期の健全性については、別途検討が必要と考えられる。

3.1 試験方法

試験に用いたモデルは Fig.9 に示すとおりであり、キャスク蓋部 1/5 縮尺モデルである。試験では、まず、繰り返し数の影響を把握するため、供試モデルの熱容量等を考慮し、実施可能な最短の時間とすることとして、1 年間の季節変動に相当する温度変化を 1 週間で繰り返し与える温度サイクル試験を実施した。次に、1 サイクルを 2 週間で繰り返し与える温度サイクル試験を実施して、繰り返し速度の影響を確認することとした。また、試験温度については、環境温度を模擬するため、貯蔵時キャスク温度解析結果に基づいて設定した。CASE 1 では、雰囲気気温度が最低 -20、最高 40 とした場合のガスケット温度に基づいて試験温度を 110~160 とした。さらに、上限温度と下限温度の差を CASE 1 の 2 倍の 100 と広げた 60~160 の CASE 2 を行った。

これらと比較のため、CASE 3 では、160 一定とした一定温度条件下での試験を実施した。

3.2 試験結果及び評価

温度サイクル試験における温度及び漏洩率の経時変化を Fig.10~Fig.12 に示す。これらで示すように、CASE 1 および

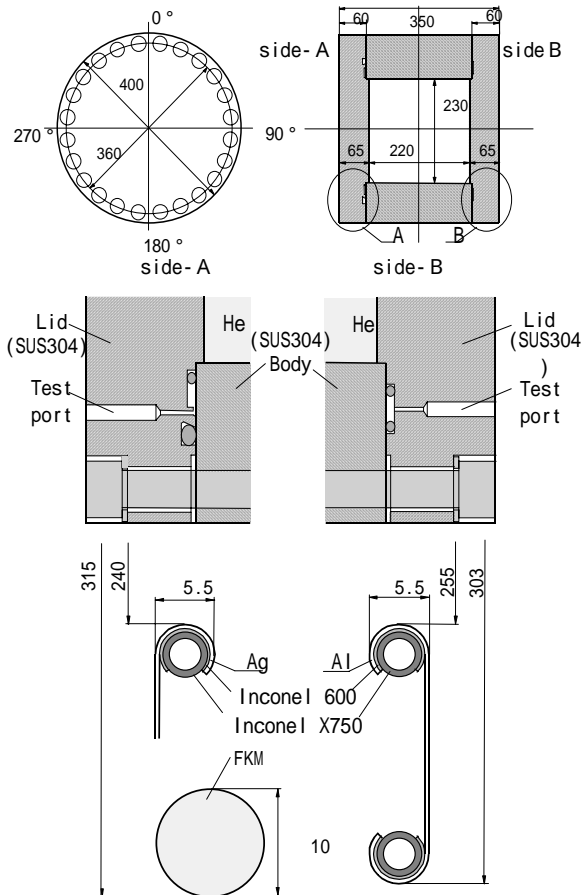


Fig.9 Specimen for heat cycle test

CASE 2 では、1 サイクルを 1 週間または 2 週間とした場合のいずれも 60 回の温度サイクルを与えたが、漏洩率に大きな変化はなく、良好な密封性能を有することが確認された。また、一定温度条件下の CASE 3 の場合、120 週間にわたり、漏洩率に変化はなく、CASE 1 及び CASE 2 との差異がないことが確認された。以上のように、繰り返し数 60 回（60 年に相当）の範囲では、密封性能に変化がないことから、貯蔵環境の温度変化の密封性能への影響はないものと考えられる。

4 結論

実物大カスク蓋部モデルを用いた長期密封性能試験及びカスク蓋部 1/5 縮尺モデルを用いた温度サイクル試験を実施した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 実カスクと同様の密封構造をもつ、実物大カスク蓋部モデルの約 9 年の密封健全性が確認された。
- (2) ラーソン・ミラー・パラメータを適用し、約 9 年間の長期密封性能試験結果を評価したところ、実貯蔵時の約 32 年に相当する密封健全性が確認できたものと推察される。
- (3) 繰り返し数 60 回（60 年に相当）の範囲では、密封性能に変化がないことから、貯蔵環境の温度変化の密封性能への影響はないものと考えられる。

謝辞

本研究は、長期間にわたる試験結果をとりまとめたものであり、試験実施に際し、東京大学 矢川元基 教授をはじめ関係各位のご指導、ご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表するものである。

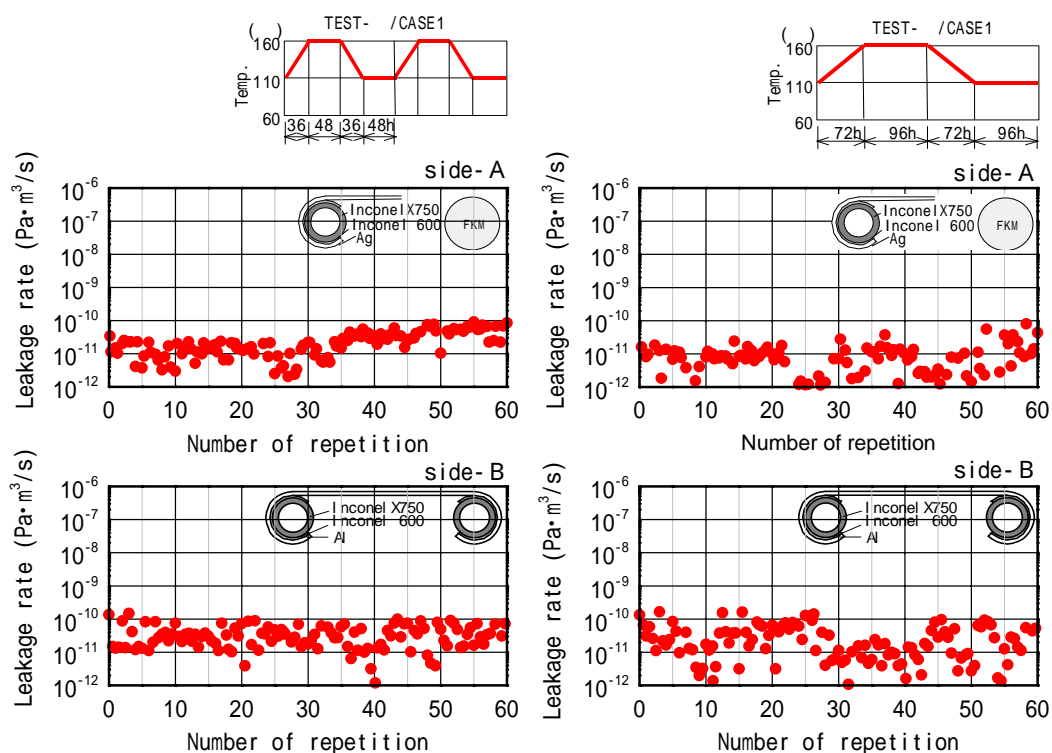


Fig.10 Test results on history of leakage rate (CASE 1)

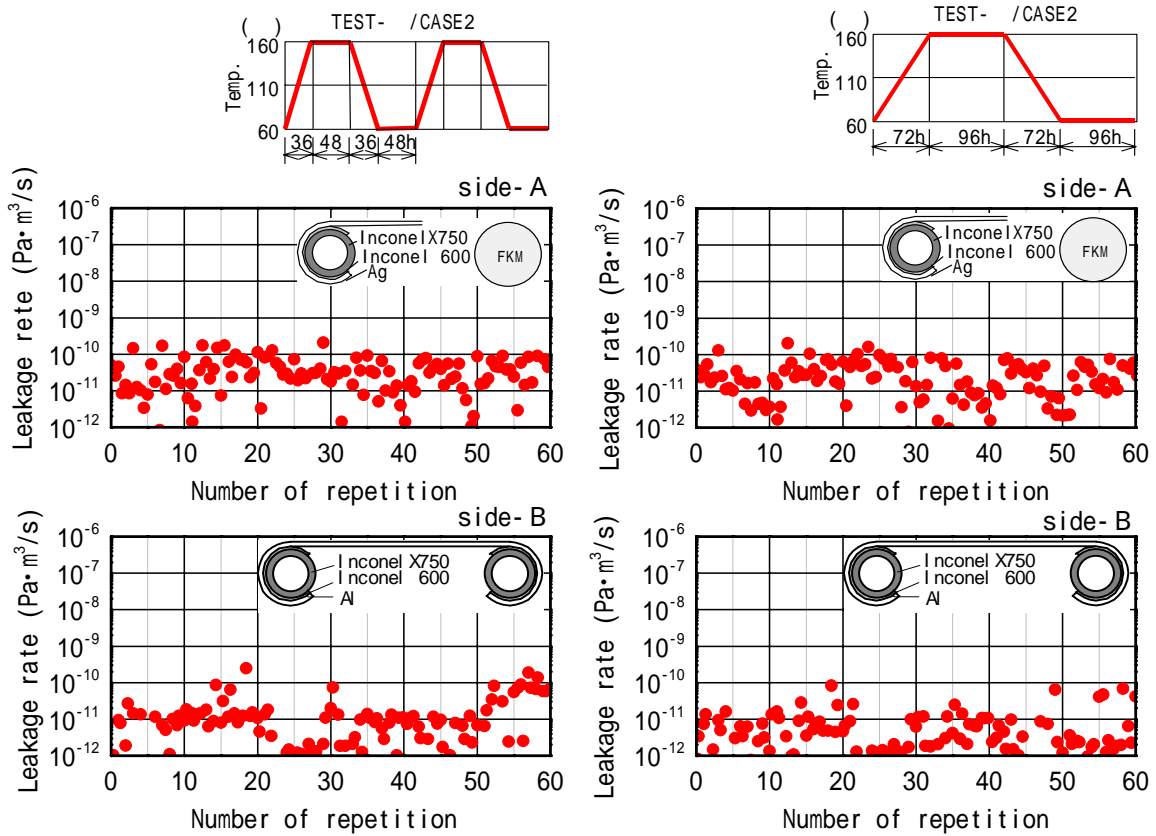


Fig.11 Test results on history of leakage rate (CASE 2)

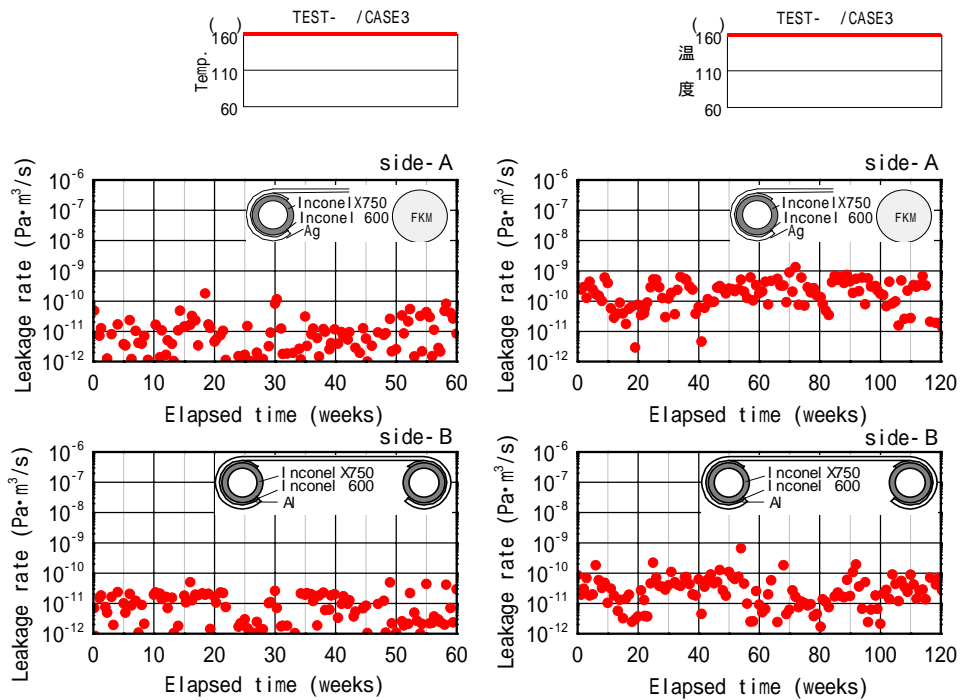


Fig.12 Test results on history of leakage rate (CASE 3)

参考文献

- [1] 加藤治, 伊藤千浩: 使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性. 電力中央研究所報告, 研究報告 No. U92009, 平成4年7月(1992).
- [2] 三枝利有, 他: 使用済燃料の原子力発電所構内キャスク貯蔵技術の評価. 電力中央研究所報告, 総合報告 No. U27, 平成5年7月(1993).
- [3] 加藤治, 三枝利有: 使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性(その2). 電力中央研究所報告, 研究報告 No. U940029, 平成6年11月(1994).
- [4] 加藤治, 伊藤千浩, 三枝利有: 使用済燃料貯蔵キャスクの長期密封性能評価手法の開発. 日本原子力学会誌 38, No.6, 527-533 (1996).
- [5] 加藤治, 伊藤千浩, 他: 使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立 - キャスクの長期密封性能評価 -. 電力中央研究所報告, 研究報告 U92034, 平成4年12月(1992).
- [6] Kato, O. et al: long-term sealability of spent fuel casks. PATRAM'92 (1992).
- [7] Benda, B.J., Langland, R.T.: Methods for Evaluating the leak tightness of spent fuel container closures, Lawrence Livermore Lab. (1980).
- [8] Droste, B: Safety evaluation of dry spent fuel storage casks. Soviet-West German Seminar, USSR, Leningrad, June 27-July 1 (1988).
- [9] 通商産業省資源エネルギー庁: 使用済燃料の乾式キャスク貯蔵に係わる技術的検討. 平成4年7月(1992).
- [10] 原子力安全委員会決定: 原子力発電所内の使用済燃料の乾式キャスク貯蔵について. 平成4年8月27日(1992).
- [11] Larson, F.R. and Miller, J.: Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses. Transactions of the ASME, JULY 1952, pp. 765-775 (1952).
- [12] 横堀武夫: 材料強度学, 技報堂 (1967).
- [13] 足立正雄: 金属クリープの基礎, 丸善 (1968).
- [14] 日本材料学会編: 金属材料強度試験便覧, 養賢堂 (1968).

