

金属キャスク貯蔵施設の除熱模型試験方法の提案

背景

原子力に関わる機器や施設の除熱設計においては、静的安全のため、自然対流現象を利用したものが多々あり、その成立性を模型試験で実証するには、相似則の使用が不可欠である。しかしながら、自然対流相似則の適用性について、模型の縮尺率、発熱条件および作動流体の種類を系統的にまとめたものはない。より小さな模型や異なる流体を用いて相似則を考慮した試験方法が確立されれば、研究開発コストの低減および計測の容易さの点で、メリットは大きい。

目的

自然対流現象を利用した施設の一例として、金属キャスク貯蔵施設(図1)を対象とし、縮尺模型を用いた試験を行い、自然対流相似則の適用範囲を明らかにし、相似則を考慮した模型試験方法を提案する。

主な成果

金属キャスクが貯蔵施設内におかれた際の熱流動現象を縮尺模型試験で模擬するための相似則の検討を行った。模型の縮尺率(想定した実キャスク高さ5.5mに対して、1/22,1/42,1/56)、発熱量(1.6~200W)および流体の種類(空気、水、グリセリン)をパラメータとした自然循環試験を実施して(図2)、以下の結果を得た。

- (1) 施設内には、「キャスク近傍の流れ」とそれに伴って発生する「施設全体の流れ」の二つの特徴的な流れがあり、キャスク近傍の自然対流境界層は、全体流れと区別して取り扱う必要がある。また、キャスク近傍の流れに対しては、 Ra^* 数^{*1}を用いて整理することが可能であり、全体流れについては、 Ri 数相似^{*2}を実施施設と一致させることで、流れを模擬した模型試験を行うことができる(図1)。
- (2) 空気を用いた試験において、模型の縮尺率および発熱量を変化させて得られた水槽内の温度分布を無次元化して比較することにより、相似則を満足することを確認した。本試験範囲においては、実キャスクの1/56縮尺模型(発熱体高さ約10cm)、発熱量1.6Wで模擬した試験も含まれており、この結果を用いて実施施設の熱流動現象を予測できる可能性がある(図3および図4)。
- (3) 流体に水およびグリセリンを使った場合、自然循環流量が空気に比べて極めて少なくなることから、一巡流路の圧損係数が大きくなり、空気試験と Ri 数相似の試験にならないことがわかった。

以上、金属キャスク施設の熱流動現象を縮尺模型試験で模擬するために、流体には、空気を用い、「キャスク近傍の流れ」と「施設全体の流れ」とに別々の相似則を考慮した試験方法を提案した。

今後の展開

相似則による実現象の予測をより高度化するには、さらにスケールアップした試験を実施し、本除熱模型試験手法の妥当性を確認することが必要である。

主 担 当 者 地球工学研究所 バックエンド研究センター 上席研究員 竹田 浩文

関連報告書 「金属キャスク貯蔵施設の除熱模型試験方法の提案」電力中央研究所報告:N06032(2007年5月)

1: Ra^ 数(修正レーリー数):浮力の大きさを表す無次元数であり、層流と乱流の識別に用いる。温度差を用いた Ra 数に対して、熱流束を用いたものを特に修正 Ra 数という。

*2: Ri 数(リチャードソン数)相似:浮力と慣性力の比率を同じにする相似条件であり、試験においては、装置の圧損係数を同一にすることを意味する。

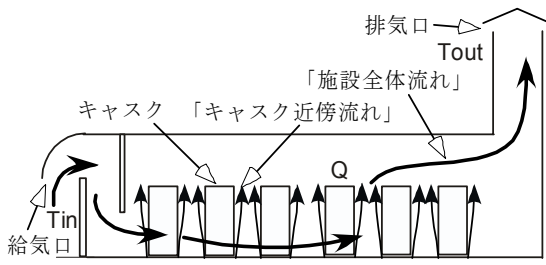


図1 金属キャスク貯蔵施設内の熱流動現象

貯蔵施設内には、「キャスク近傍の流れ」とそれに伴って発生する「施設全体流れ」が存在する。前者は、Ra*数で整理することができる。また、後者は、Ri数を実施設と一致させることで、流れを模擬した模型試験ができる。

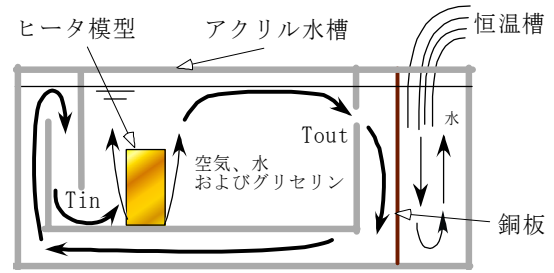


図2 試験装置

水槽内にキャスクを模擬した発熱体(ヒータ模型)を設置し、流体に空気、水およびグリセリンを使用して自然循環試験を実施した。なお、形状が相似な三種類の大きさの装置を用いた。

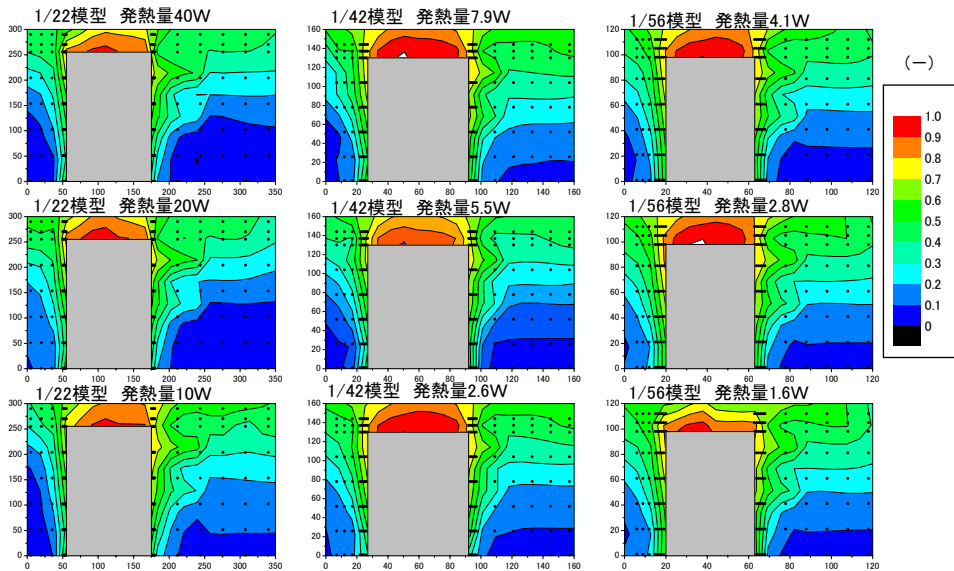


図3 無次元温度分布(空気)

模型の縮尺率および発熱量をパラメータとした9ケースの試験を実施し、それぞれの試験で計測された水槽内の最大温度と最少温度の差(ΔT)を用いて無次元温度分布を比較したところ、パターンが類似することが分かった。

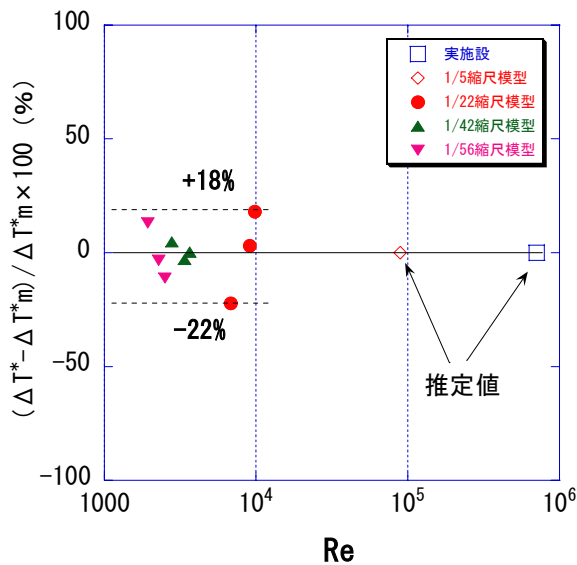


図4 Re数に対するΔTの規格化値

$$\Delta T^* \propto \frac{\Delta T}{L^{-5/3} \times Q^{1/3}}$$

L : 模型寸法
Q : 発熱量

図3で無次元化に使用したΔTは、本相似則によると模型寸法と発熱量の関数になっていることから、それぞれの試験条件に合わせて規格化(ΔT*)した。その結果、平均値(ΔT*m)に対して、約±20%のばらつきで一致することが分かった。このことと、図3に示した無次元温度分布のパターンが類似することを考え合わせると、今回実施した模型試験結果から実施設の熱流動現象を予測できる可能性がある。