

設計の弱点を見抜く「技」～クライオポンプの熱構造設計～

村瀬 尊 則

『探偵術において最も重要なのは、数多くの事実の中から、どれが付随的な事柄でどれが重大な事柄なのかを見分ける能力です。』これは名探偵シャーロック・ホームズの小説に出てくる台詞ですが、エンジニアにとっても、この「探偵術」は必要不可欠な能力です。特に、設計の初期段階において、設計のどこに問題が存在するのかを見つけ出すのは名探偵（ベテラン設計者）でも容易ではありません。そこで活躍するのが、探偵7つ道具ならぬ、シミュレーション技術「CAE解析」です。コンピュータを使う設計というと、CAD（Computer Aided Design）を思い浮かべる方がいらっしゃるかもしれませんが、CADはコンピュータで図面設計を支援する技術、一方、コンピュータ上での実験に当たるのが、CAE（Computer Aided Engineering）です。今回は、大型ヘリカル装置（LHD）内部で使う真空排気装置の一つである「ダイバータクライオポンプ」（詳細は、NIFSニュース2017/223号の「研究最前線」をご覧ください）を例にして、CAE解析を活用した設計についてご紹介します。

図1に写っているドーム型の装置が、クライオポンプです。ご覧のとおり、長細い装置で、断面のサイズは約20センチメートル、長さは約3メートルあります。金太郎飴のように、どこで切っても同じ断面構造となっています。LHDの内部には、プラズマにならなかった余分な水素ガスを速やかに取り除くダイバータと呼ばれる排出機構があり、

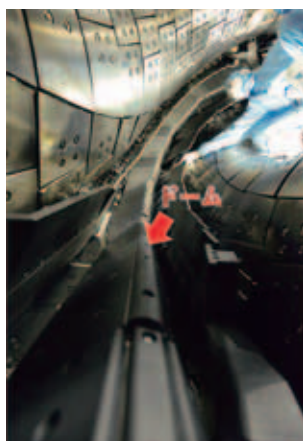


図1 真空容器内に設置されたクライオポンプ

その排気ポンプとして使われるのがクライオポンプです。クライオポンプの中には、無数の細かい孔を持つ活性炭が貼り付いた吸着パネル（図2）が内蔵されています。活性炭をマイナス250度以下に冷やすと、ポンプ機能を発揮するようになります。そのため、吸着パネルの周りに防護壁

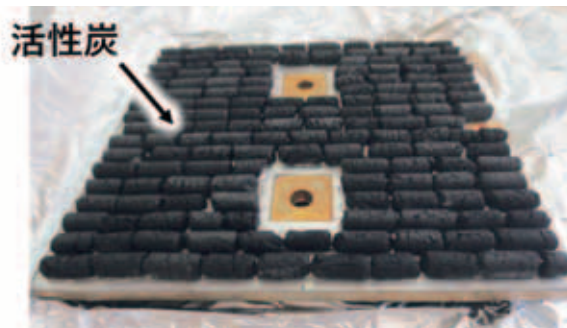


図2 クライオポンプ内部の吸着パネル。表面には活性炭がびっしり貼り付けてあります。

（シールド）をつくり、1,000度以上に加熱されるダイバータ板の輻射熱（太陽や薪ストーブの熱など、直接電磁波で伝わる熱のことをいいます）から守らなければなりません。その一方で、ポンプとして機能するには、できる限り大きな排気口も必要です。このように相反する条件を、図1のような狭い場所でクリアしなければならないのです。

そこで、まず図3のような断面構造のプロトタイプが設計されました。プラズマの熱から守るため、ドーム型の耐熱タイルが配置され、その下にクライオポンプが設置されています。クライオポンプは、ルーバーと呼ばれるブラインド形状の排気口を持った水冷シールドと液体窒素で冷却されるシールドの、二段階のシールドで吸着パネルを守っています。この構造は、従来の経験やノウハ

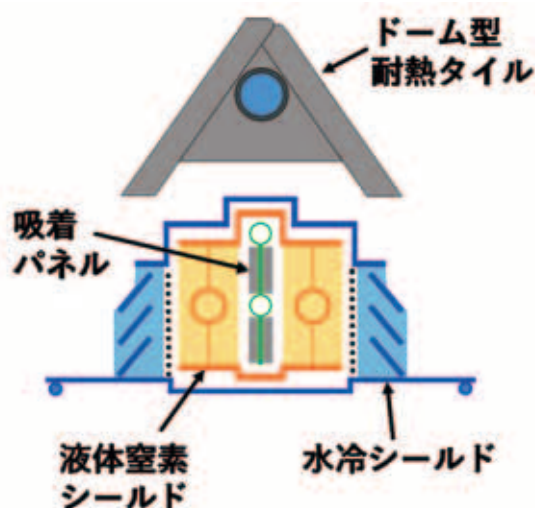


図3 プロトタイプ型クライオポンプの断面模式図

ウに基づいて設計されています。これをLHDに合った、熱に強く、高性能なポンプへとパワーアップすることが、今回の使命です。

さて、いよいよここからCAE解析の出番です。3次元CADで製作した構造データを使い、密度や比熱、熱伝導率（熱の伝わりやすさ）といった材質を設定し、周囲から輻射熱を加えます。さらに、冷却水の温度、真空容器への固定方法など、できるだけ実際の環境に近い条件を模擬して計算を行います。このCAE解析のおかげで、計算結果として各シールドの温度分布（図4）、熱による変形、応力やひずみ量など様々な情報が手に入ります。探偵ホームズは、靴に付いた土など一見些細な物事をよく観察し、事件を解く鍵となる証拠を見つけ、事件の真相に迫っていきます。今回の『事件』は、吸着パネルの温度が思ったように下がっていないことでした。そこで熱の流れを確認すると、冷却水の流量で決まる冷却水で除去可能な最大熱量に対して、実際に除去されている熱量が2割程度の低い値に留まっていることが分かりました。ここに着目し詳しく調べてみると、水冷シールドに来た熱の一部がそのまま通過してしまい、その結果、液体窒素シールドや吸着パネルの負担が大きくなっていることが分かりました。この手掛かりから、「もっと熱をしっかりと受け止める水冷シールド構造にできないか?」、「ルーバーを無くし、排気口を下にすればどうか?」、「窒素シールドも簡素化し

て、より排気しやすい構造にできないか?」などの改良案が浮かんできました。このコンセプトをもとに20種類以上の設計案をCAE解析で検討した結果、多くのアイデアを盛り込んだ図5のような構造にたどり着きました。また、構造の検討には3Dプリンターで作った模型（図6）も活用しています。頭の中に描いたアイデアを、実際に手に取って形状を実感できるので、新たな改善提案にも役立ちます。

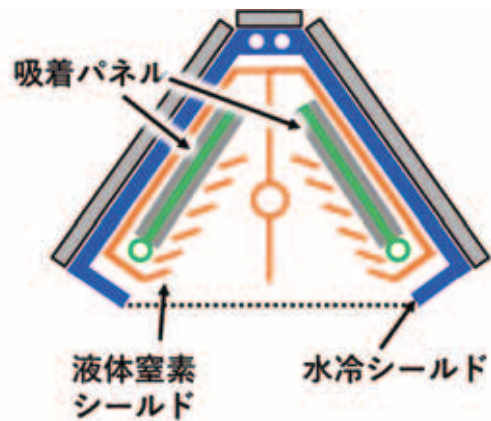


図5 CAE解析を用いて改良したクライオポンプの断面模式図



図6 3次元CADのデータをもとに3Dプリンターで製作した改良型クライオポンプの模型

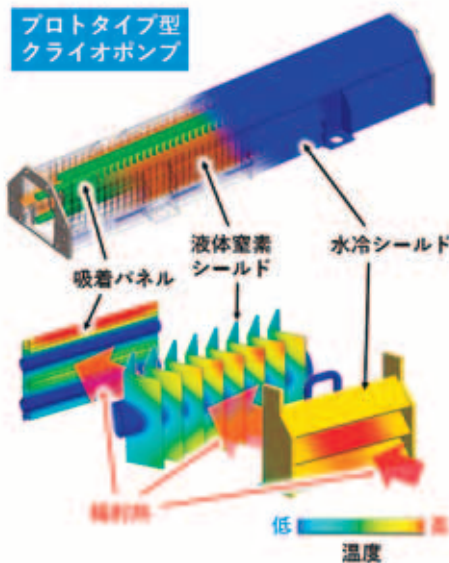


図4 プロトタイプ型クライオポンプのCAD図およびCAE解析の結果（温度分布）

こうした設計プロセスにより、LHDに適合する耐熱性の高い構造が実現できたほか、吸着パネルの面積は2倍以上に改善し、高性能化させることができました。このような熱構造設計を経て、クライオポンプはLHDに設置され、現在、多くのプラズマ実験で使われています。

今や設計になくてはならない、道具というより探偵ホームズの相棒「ワトソン」のような存在となっているCAE解析。この瞬間にも、新たな装置を生み出すべく設計の最前線で活躍しています。

（技術部装置技術課 実験応用技術係長）