



5. 熱交換器の基礎

5. Basis of the Heat Exchanger

河原 全作

KAWARA Zensaku

京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻

(原稿受付：2017年4月10日)

ブランケットで発生した熱を発電に利用するために流体を用いてブランケットからタービンに熱輸送する必要があるが、ブランケットで用いる流体をそのままタービンに輸送することは現実的ではない。そのため、ブランケットとタービンではそれぞれ独立した流体ループを用い、熱交換器を介して両流体ループ間で熱のみを移動させる設計が採用される。この章では、熱交換器の分類と設計に関する基礎事項ならびに既存の発電炉での利用について紹介するとともに、熱交換器におけるトリチウム移行の評価について述べる。

Keywords:

blanket, heat exchanger, overall heat transfer coefficient, tritium transfer

5.1 はじめに

ブランケットで発生した熱を最終的な利用形態である電気に変換するには、ブランケットから熱を確実に取り出してタービンに輸送する必要がある。空間的に離れたコンポーネントへの熱輸送には流体ループを用いることが一般的であるが、ブランケット除熱に適する流体とタービンに用いる流体は必ずしも一致しない。腐食生成物の放射化・蓄積やトリチウムインベントリの抑制を考慮すれば、単一流体ループの使用は得策ではなく、ブランケット除熱とタービンによるエネルギー変換にはそれぞれ一次流体、二次流体と呼ばれる流体による独立したループを用いるとともに、熱交換器によって一次流体と二次流体の間で熱のみを移動させることが現実的な手段となる。集積回路の冷却から既存の発電システムに至るまで、スケールの大小を問わず、様々な種類の熱交換器がそれぞれの特徴を生かす形で利用されている。本章では、まず、熱交換器での伝熱の基礎を述べ、次に各種熱交換器の形状と特徴を紹介する。また、一次流体ループと二次流体ループを用いる発電システムの先例として、加圧水型原子炉および高速増殖炉の蒸気発生器について紹介する。最後に、核融合で特有の課題であるトリチウム透過の熱交換器での評価について述べる。

5.2 熱交換器の基礎

5.2.1 熱交換器の種類

熱交換器は、高温の流体と低温の流体の間で熱を受け渡すシステムであり、伝熱方式、構造、流路方向などによって以下のように分類されている。

(a) 伝熱方式による分類

- ・ 隔壁式（表面式）……一般に熱交換器と呼ばれるもの
- ・ 蓄熱式熱交換器……回転型全熱式など
- ・ 液体連結間接式熱交換器……ガス冷却塔など
- ・ 直接接触熱交換器……開放式冷却塔など

(b) 構造による分類

- ・ 管状……二重管型、シェルアンドチューブ型
- ・ 平板状……プレート型
- ・ 拡大伝熱面……フィンアンドチューブ型、プレート
アンドフィン型(コンパクト熱交換器)
- ・ 蓄熱式……回転型全熱式

(c) 流路方向による分類

- ・ 向流型熱交換器
- ・ 並流型熱交換器
- ・ 直交流型熱交換器

熱交換器の設計にあたっては、高温流体と低温流体の種類、温度条件、圧力条件、熱交換量、その他の制限条件を考慮して、それぞれの対象について最適な熱交換器を採用することになる。一般的な熱交換器については、多くのハンドブック・資料・著書が発刊されているので、詳細についてはそちらを参照していただきたい[1-3]。

5.2.2 壁を隔てた熱交換と熱通過率

熱交換器の設計では冷房機器や冷凍機のように低温流体を一次側として扱う場合もあるが、本章はブランケットからの熱をタービンに輸送にするシステムを対象としているため、以下では一次側を高温流体として話を進める。また、基本的に一次流体と二次流体の混合を望まない立場から、隔壁式熱交換器に限定して述べる。

図1は隔壁式熱交換器内での熱交換の模式図である。隔壁(厚さ δ , 熱伝導率 λ)を隔てて高温(一次)流体と低温(二次)流体が流れているものとする。それぞれの流れの向きが同じ場合は並流型、逆向きの場合は向流型である。高温流体から低温流体への熱の流れは、(a)高温流体側隔壁表面での流体から壁への伝熱(熱伝達係数 α_h)、(b)壁中の熱伝導による熱移動(熱伝導率 λ)、(c)低温流体側隔壁表面での壁から流体への伝熱(熱伝達係数 α_c)によって行われる。定常状態では、(a)~(c)の熱移動における熱流束 q が等しいので次式が成立する。

$$q = \alpha_h(T_h - T_{wh}) = \alpha_c(T_{wc} - T_c) = \lambda(T_h - T_c)/\delta \quad (1)$$

式(1)を整理し、熱流束 q を流体間温度差で表すと式(2)が得られる。式(3)で表される比例定数 K は熱通過率もしくは総括伝熱係数と呼ばれ、熱伝達係数と同じ次元[W/m²K]を持つ。熱通過率 K は、熱交換器における伝熱を総括する物理量であり、熱交換器の設計に広く用いられている。

$$q = K(T_h - T_c) \quad (2)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_h} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_c} \quad (3)$$

図1は熱の流れ方向のみの一次元に単純化したものであるが、実際の熱交換器では流路はどのような形式であっても一次流体と二次流体それぞれの入口と出口があり、熱交換によって一次側流体の温度はその入口から出口に向かって低下し、二次流体の温度は上昇する。そのため、熱交換器内の局所的な流体間温度差と熱輸送量は位置の関数となる。熱交換器の総熱交換量は局所的な熱輸送量を流路入口から出口まで積分することで評価できる。

一次・二次流体の流路が同じ方向の体系の場合、流体の比熱および熱通過率が一定で定常状態であれば、総熱移動量 Q は次式で求められる[3]。

$$Q = K\Delta T_{lm}A \quad (4)$$

$$\Delta T_{lm} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2) \quad (5)$$

式(5)の ΔT_{lm} は、両出入口それぞれの温度差 ΔT_1 , ΔT_2 から算出される対数平均温度差と呼ばれるパラメータである。式(4)は並流型と向流型のどちらでも成立すること、一次流体と二次流体の局所温度差を用いなくても単一の温度差で熱交換性能を評価できるため、対数平均温度差を用

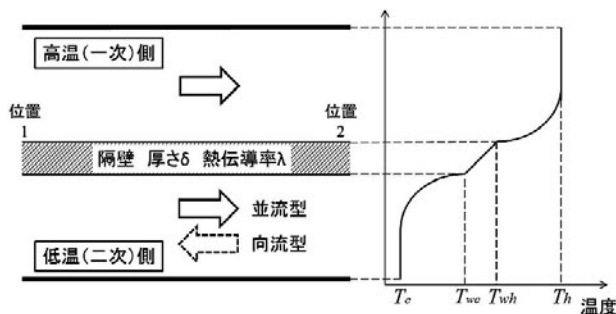


図1 熱交換器内での流体間の熱輸送。

いた式(4)は熱交換器の設計において広く用いられている。

一方、隔壁の厚さ・材質・温度・熱伝達率および表面での熱伝達係数が一様と見なせない場合には、局所熱通過率を得るために数値解析などで温度場・流動場を求めて熱輸送量を評価することになる。

5.2.3 熱交換器の工学的問題

性能変化 実際の流体ループ内を流動する流体は必ずしも清浄ではなく、また配管内壁の腐食などにより不純物が生成される可能性がある。そのため、流体に混ざっている不純物の隔壁表面への堆積や、相変化を伴う熱交換器における伝熱面表面へのスケールの付着など、汚れ(fouling)への対応が重要となる。汚れの層の存在は熱通過率を低下させるが、汚れによる熱交換器の性能変化を正確に予測するのは難しく、同様のシステムや実機の運転経験から想定される追加の熱抵抗(汚れ係数)を考慮してあらかじめ熱通過率の低下を評価しておく場合が多い。隔壁両面の汚れ係数をそれぞれ f_h , f_c とすると、熱通過率は次式で与えられる。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_h} + f_h + \frac{\delta}{\lambda} + f_c + \frac{1}{\alpha_c} \quad (6)$$

構造上の問題 伝熱性能のみを考えれば、熱交換器の隔壁は薄い方が熱通過率が高く、小さな温度差で高熱流束となるので、熱交換器のコンパクト化と熱応力問題ではプラスに働く。一方、隔壁が薄肉の場合には、耐圧性能や流力振動などに対する強度、腐食による減肉への余裕度、そしてトリチウム透過の点でマイナスになる。設計にあたってはこれらトレードオフの関係にある事象について十分な検討が必要である。

5.2.4 核分裂炉における熱交換システムの例

既に発電炉として実用に供されている核分裂炉では様々なタイプの熱交換器が用いられ、そのサイズや使用環境(温度、圧力、流量、使用流体など)は核融合炉で想定されるケースに近いものもあり、核分裂炉の開発と運用で得られた知見と経験は核融合炉における熱交換器開発においても有用である。以下に、核分裂炉での熱交換器実用例として、最も一般的に使用されている加圧水型軽水炉(PWR)と液体金属を用いている高速炉の蒸気発生器について紹介する。

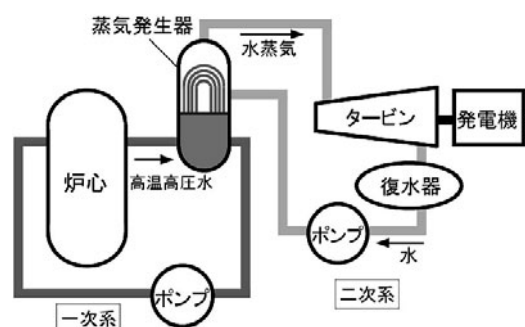


図2 加圧水型原子炉の系統。

加圧水型軽水炉（PWR）の蒸気発生器

世界的に商用運転されている発電用原子炉の多くは軽水冷却炉であり、その中で最も多く運用されているタイプは加圧水型原子炉（Pressurized Water Reactor, PWR）である。図2にPWRの冷却システムを示す。PWRでは炉心を冷却する一次系ループとタービンを駆動し発電させる二次系ループ間では物質輸送は行われず、蒸気発生器で熱交換を行う。一次冷却系は15 MPaまで加圧され、サブクール（系圧力における沸点より低温の）状態の高温高圧水が循環している。蒸気発生器はそれぞれの原子炉によって異なるが、日本国内では一次側が3000～6000本の逆U字管群、二次側が胴（直径約5 m 高さ約20 m）の大型シェルアンドチューブ型熱交換器が用いられている。炉心で加熱された高温の一次冷却水は逆U字管（外径約20 mm, 肉厚約1 mm）内を流れ、管の外側を流れる二次冷却水（圧力6 MPa）を沸騰させる。スケール発生と炉心での放射化の原因となる高温高圧下での相変化によるエロージョン、コロージョンを避けるため、一次冷却水、二次冷却水とも厳しく純度制御が行われている。U字細管には水・蒸気系で高い耐食性を有するインコネル合金が採用されている。蒸気発生器の細管の保守管理はPWRにおいて非常に重要で、過去には細管振れ止め金具の挿入不良による高サイクル流体力振動によって破断し大量の放射化した一次冷却水が二次側に漏洩した事故を経験している（1991年、美浜原子力発電所二号機）。

高速炉の中間熱交換器、蒸気発生器

高速中性子による核反応を利用する高速炉では、その開発過程で冷却材として液体ナトリウム等の液体金属が用いられてきた。液体金属は水に比べて熱伝導率が1桁から2桁大きく沸点も高いため、発熱密度が軽水炉に比べて高い高速炉において、伝熱の観点からは優れた冷却材である。しかし、冷却材の放射化やアルカリ金属であるナトリウムの高い化学的活性などへの工学的課題も多い。図3に示すように、高速増殖炉「もんじゅ」では二段階の熱交換を行い、炉心～一次ナトリウムループ～中間熱交換器～二次ナトリウムループ～蒸気発生器～高温高圧水・水蒸気ループ～タービンの系統となっている。炉心を循環する一次ナトリウムループとタービンを駆動する水・蒸気ループの間に二次ナトリウムループを設置することにより、放射化した一次ナトリウムと水の直接的な接触が起きる可能性を排除している。ナトリウムと水が接触する可能性が最も高いのは薄肉隔壁を隔ててその両側で水とナトリウムが流れている蒸気発生器と想定されるので、多くの開発研究がなされてきた。一般的に、液体金属冷却高速炉は軽水炉よりも作動温度が高温であり、蒸気発生器内の伝熱隔壁は水（もしくは水蒸気）とナトリウムの両方に曝される厳しい環境条件にある。過去の高速炉開発では様々な形式の熱交換器が採用されてきた。「もんじゅ」では、材料の健全性の観点から蒸気器（ナトリウム－高温高圧水の熱交換）と過熱器（ナトリウム－水蒸気の熱交換）に分離されたらせん状貫流型熱交換器が採用されたが、複雑な構造はメンテナンスや検査において不利であるため、次世代炉に関しては、直

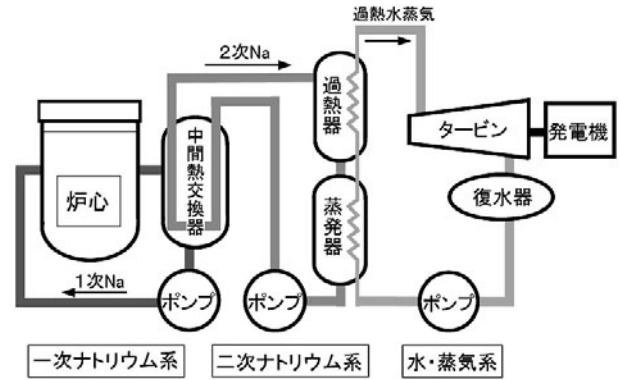


図3 高速増殖炉もんじゅの冷却系統。

円筒二重管構造も開発課題に挙がっている。

5.3 トリチウム移行

通常の隔壁型熱交換器では、一次側と二次側は固体壁で隔てられ熱のみが輸送されるため、物質輸送を考慮する必要はない。しかし、核融合炉では金属リチウム、リチウム鉛、フリーベ等の液体トリチウム増殖材を冷却材として用いるブランケット設計が提案されており、この場合高濃度のトリチウムを含有した流体が熱交換器の隔壁に到達することになる。トリチウムおよびトリチウムを含んだ化学種は高温下で容易に金属壁を透過する性質を有しているため、核融合炉の熱交換器では隔壁を透過して二次流体に移行するトリチウム量を評価する必要がある。

熱交換器の隔壁を介して一次流体から二次流体にトリチウムが移行する過程は、(a)一次流体中のバルク領域から隔壁界面近傍への拡散（境界層内の物質移動）、(b)一次流体と隔壁界面での移行（酸化膜中の拡散）、(c)隔壁材料中の拡散、(d)隔壁と二次流体の界面での移行（境界層内の物質移動）、(e)隔壁界面近傍から二次流体バルク領域への拡散（境界層内の物質移動）が一次的に繋がった現象となる[5,6]。これと熱交換器での熱輸送にはアナロジーが成立するので、熱通過率（総括伝熱係数）と同様にして、総括トリチウム移動係数を用いてトリチウム移動流束が評価できることを意味する。前述の(a)は一次系の熱伝達、(b)は一次系の汚れによる温度差、(c)は隔壁の熱伝導、(d)は二次系の汚れによる温度差、(e)は二次系の熱伝達にそれぞれ対応するので、式(6)と同じ形になる。

一次系および二次系のトリチウム濃度をそれぞれ C_1 、 C_2 、一次系から二次系への総括トリチウム移動係数を K_T とすれば、トリチウム移動流束 N_T は次式で表すことができる。

$$N_T = K_T (C_1 - C_2) \quad (7)$$

ここで、一次流体、一次側酸化膜、隔壁、二次側酸化膜、二次流体でのトリチウムの拡散係数をそれぞれ D_1 、 D_{o1} 、 D_w 、 D_{o2} 、 D_2 とし、一次側、二次側の酸化膜の厚さを δ_{o1} 、 δ_{o2} とする。また、一次側、二次側のシャーウッド数を Sh_1 、 Sh_2 とする。シャーウッド数はトリチウム移動係数が対流により静止時に比べて増大する程度を表す無次元数で

ある。これらの物理量を用いれば、 K_T は次式で表される。

$$\frac{1}{K_T} = \frac{1}{Sh_1 D_1} + \frac{\delta_{o1}}{D_{o1}} + \frac{\delta}{D_w} + \frac{\delta_{o2}}{D_{o2}} + \frac{1}{Sh_2 D_2} \quad (8)$$

酸化膜の厚さおよび拡散係数単独の測定が困難な場合には、汚れ係数と同様に式(8)の右辺第2項と第4項の形で得ることにより、総括トリチウム移動係数 K_T を評価することができる。

式(8)は熱交換器内のある隔壁位置の局所的なトリチウム移動を評価する係数であり、熱交換器での総トリチウム移動量は、熱交換器入口から出口までの移動量を積分することで求められる。将来的にトリチウム移行を考慮した熱交換器の設計を行うには、その使用環境下における式(8)の右辺各項の物理量の評価法やデータベースの確立が必要である。

5.4 まとめ

この章では、熱交換器の基礎としてまず熱交換器の分類

について紹介し、次に隔壁型熱交換器における熱通過率について説明した。また、伝熱面の汚れによる性能変化等について述べた。さらに、核融合炉で用いられる熱交換器に参考となる実用例として、核分裂炉 (PWR および高速炉) で利用されている熱交換器について紹介を行った。最後に、熱交換器でのトリチウム移行について、熱輸送と物質移動のアナロジーからの評価方法について述べた。

参考文献

- [1] 日本機械学会編：伝熱工学資料 (改訂第5版) (丸善, 2009).
- [2] 日本機械学会編：日本機械学会基準 熱交換器の熱的設計法 (JSMES001-1996) (1996).
- [3] 日本機械学会：JSME テキストシリーズ 伝熱工学 (2005).
- [4] 神田 誠 他：原子力プラント工学 (オーム社, 2009).
- [5] 片山一成, 奥野文人：プラズマ・核融合学会誌 92,136 (2016).
- [6] S. Fukada *et al.*, Fusion Eng. Des. 83, 747 (2008).



かわら ぜん さく
河原 全 作

京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻講師。工学博士。原子炉・核融合炉及びエネルギー機器における熱流動現象を中心に、沸騰・対流などの伝熱や気液二相流などの混相流に関する研究を行っています。1978年以来、学生・教員としてずっと京都大学にいますが、住まいは滋賀県のどかな田園地域で、蚊・雑草と日々格闘しています。