

エネルギー変換システム

概要 / 目的:

1781年、James Wattが回転運動を行う高圧蒸気エンジンを発明し、この蒸気エンジン及び高圧ボイラー技術の進化が1884年のCharles Parsonの蒸気タービンを使った発電機の発明に繋がりました。それから130年以上、世界中のほとんどの火力発電所と全ての原子力発電所で熱から電気へのエネルギー変換に蒸気タービンが用いられてきました。特に原子力発電所では、第1世代～3世代の原子炉の蒸気温度の調整に、蒸気タービンとランキン熱力学サイクルを用いています。原子炉から発生する高温の熱エネルギーを利用するために従来採用しているランキンサイクルから、ヘリウム(又は窒素)ブレイトン又は超臨界CO₂ガスタービンサイクル等に移行することで、よりシンプルなプラントシステムあるいは高いエネルギー効率を得られる可能性があります。また、システム内で蒸気を用いないため、特にSFRではナトリウム-水反応を大幅に抑えられる等の利点もあります。本ウェビナーでは熱力学の基礎とエネルギー交換系の性能限界について、ならびに第4世代原子炉のエネルギー交換システムに対する技術オプションを説明します。

講演者紹介:

リチャード・ステインズビー博士は、計算流体力学と熱伝達の博士号を持つ機械工学者です。英国国立原子力研究所の先進原子炉と燃料サイクルの主任技術者であり、NNLに入社する前は研究施設と産業界の両方で働いていました。過去32年間、軽水炉、高温ガス炉 (HTGR)、液体金属炉、ガス高速炉の研究に従事しています。



南アフリカのPBMRでは炉心設計とプラント全体のシミュレーション、南アフリカの国家原子力規制局では高温ガス炉のライセンスツールの開発に携わっています。また、GIF GFRシステム運営委員会の元委員長であり、現在はGIF SFRシステム運営委員会のEuratomメンバーでもあります。ガス冷却高速炉(GFR)に関する2つの欧州プロジェクト(GCFR-STREPとGoFastR)を主導し、2009年から2013年の間、Euratom CP-ESFRプロジェクト内の革新的アーキテクチャとプラントバランスのサブプロジェクトのリーダーを務めました。

トピックス:

原子炉とその電力変換システムとの連結: 原子炉は、電力変換システム(または熱機関)の要求に適合するように、制御可能で十分な品質の熱の流れを供給しなければならないけません。熱機関は、原子炉入口への冷却材の安定した流れを供給しなければならないならず、材料限界と中性子要求を考慮する必要があります。原子炉は、化石燃料プラントのように燃料の流れに依存しない、温度に依存する熱源です。

Why are Gen IV reactors different from other nuclear reactors ?

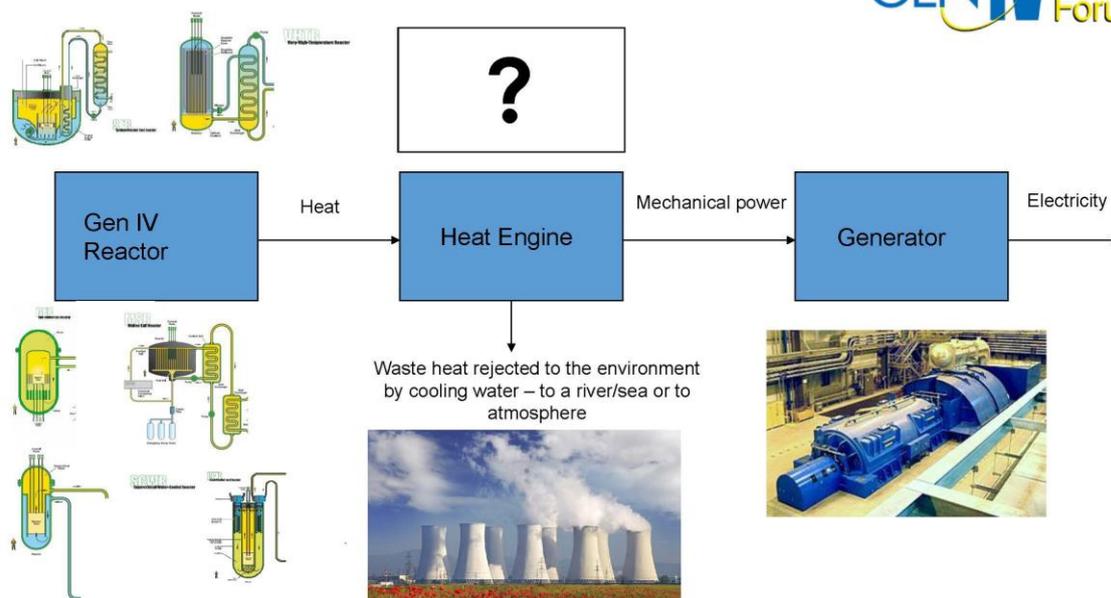


- At least 3 concepts are intended to operate at high-temperature – so we need heat engines that can exploit high temperature heat sources efficiently.
 - A conventional Rankine (steam) cycle will not make best use of heat of such high quality.
- The architecture of some high-temperature systems is based on using the fluid returning from the power conversion system to cool the reactor pressure vessel (RPV).
 - This places an upper limit on the amount of waste heat recovery (recuperation) we can employ.
- Two of the concepts are gas cooled. All gas-cooled reactors use a low density coolant that consumes a lot of power to circulate.
 - The coolant circulation power can consume a significant fraction of the power output,
 - It is important to minimise the core pressure drop and to minimise the primary flow rate ($P_c \propto Q^3$).

4

第4世代炉用の熱機関: 6種類のGen IV原子炉すべてに最適な熱機関はありません。与えられた熱量に対してどれだけの機械的なパワーを得られるかを考え、熱を環境にできるだけ放出せず、システム全体の効率を最大化する必要があります

Gen IV Nuclear Power Stations

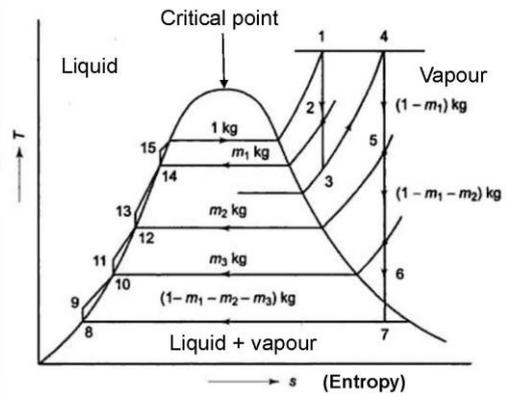
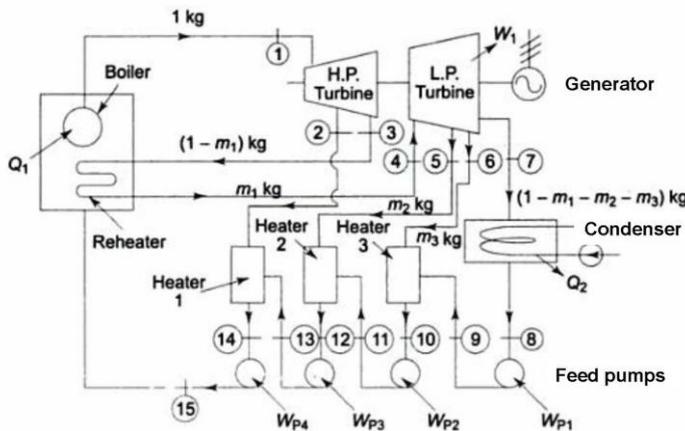


8

トピックス(続き):

ランキンサイクル: ランキンサイクルは120年以上前から知られており、世界の発電所の発電方法として利用されています。作業率に優れ、熱の付加と排熱のバルクがともに恒温過程として発生するため、高効率が達成されています。

The steam Rankine cycle

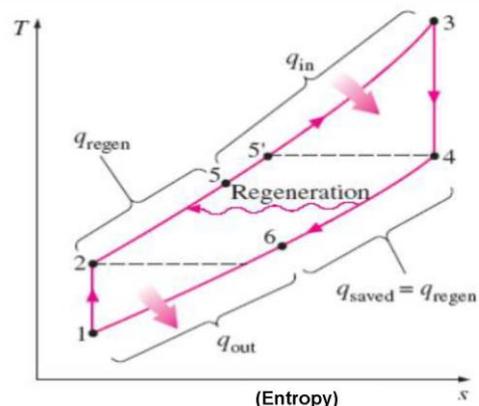
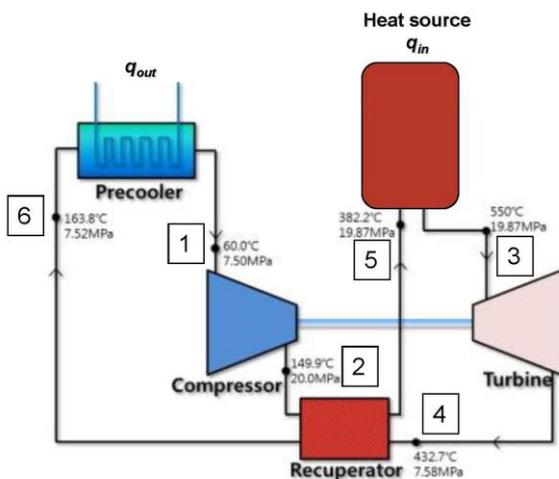


- Rankine cycle with reheat and feed heating (typical of an AGR)

24

ブレイトンサイクル: 高温発電の場合、タービン技術を発電に応用することができます。良いガスタービンサイクルのためには、4と3の高低差を1と2の高低さに比べてできるだけ大きくする必要があります。

Gas Brayton (regenerative) cycle



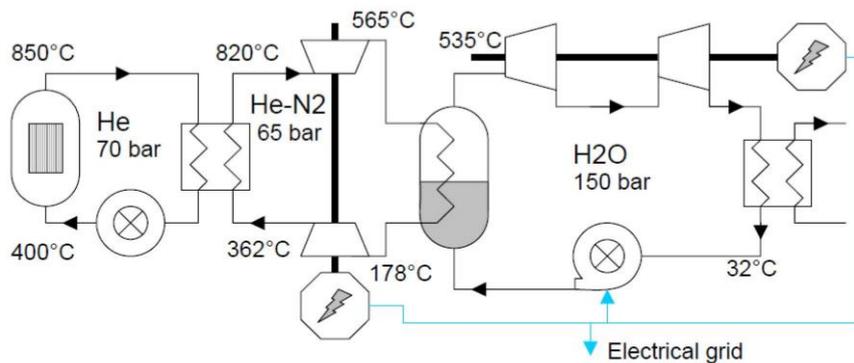
- Closed cycle gas turbine with recuperator to re-use the waste heat from the turbine exhaust

26

トピックス(続き):

コンバインドサイクル:コンバインドサイクルは、多くの化石火力CCGT発電所で使用されている実績があります。ガスタービンや高効率のガス対ガスレキュペレーターは高価である。一方、蒸気タービンは安価であり、熱回収型蒸気発生器はリスクの低い技術である。

Combined Cycle for high temperature reactors (GFR in this example)

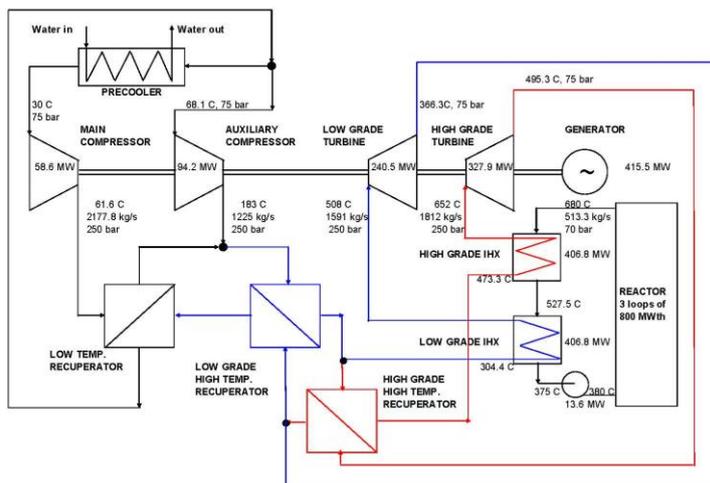


1. Direct cycle, $T_{in} = 480^{\circ}\text{C}$: $\eta \sim 47.5\%$
2. Indirect cycle, $T_{in} = 480^{\circ}\text{C}$: $\eta \sim [45.5 - 45.6]\%$
3. Direct cycle, $T_{in} = 400^{\circ}\text{C}$: $\eta \sim 44.8\%$
4. **Indirect combined cycle, $T_{in} = 400^{\circ}\text{C}$: $\eta \sim [44.4 - 44.7]\%$**
5. Indirect cycle, $T_{in} = 400^{\circ}\text{C}$: $\eta \sim [42.4 - 42.8]\%$

28

超臨界CO₂:超臨界流体を用いたガスタービンサイクルです。このサイクル技術は熱化学的には非常によく理解されていますが、工学的には実用性を確認する必要があります。最大の問題点は、非常に高圧で運転しなければならないことです。

Supercritical CO₂ - an option for SFR and a fall-back option for GFR



- For GFR a supercritical CO₂ recompression cycle can deliver similar performance for to a helium Brayton cycle operating at 850°C for a core outlet temperature of 680°C:

• $\eta = 46\%$

30