

ホワイトペーパー

燃料電池システムのシステムレベル設計

Simulink と Simscape によるモデル化およびシミュレーション

このホワイトペーパーでは、Simulink® および Simscape™ を使用した電動モビリティ用燃料電池システムの設計およびシミュレーションについて説明します。Simulink および Simscape が以下をどのようにサポートしているかを例をあげて解説します。

- 熱、気体、液体システムなどの燃料電池システムのマルチドメイン物理モデリングおよびシミュレーション。
- さまざまなレベルのモデル詳細度。

燃料電池は数十年にわたり、さまざまなアプリケーションの電源として利用されてきました。一例として米国の宇宙開発プログラムにおける燃料電池の使用が挙げられます。今日では、水素を動力源とする燃料電池は、グリーン モビリティ トランスフォーメーションの基本構成の1つと考えられています。

燃料電池は長期にわたって使用されてきたことから実証済みの成熟したテクノロジーのように思われますが、電動モビリティの電源として展開する場合、車両効率や航続距離への影響などいくつかの課題があります。

燃料電池電気自動車 (FCEV) ドライブシステムは、電気、機械、熱力学、さらには燃料電池膜を通過する気体の拡散に関わる化学など、さまざまな工学領域の多くのコンポーネントで構成されています。これらのコンポーネントの設計は、個別に、またシステム全体として、車両の性能に影響します。設計のモデル化および最適化は、より広範囲な条件でのテスト、開発時間の短縮、コストの削減に役立ちます。

このホワイトペーパーでは、Simscape を使用した、燃料電池モデルとそれをサポートするシステム (バランスオブプラント) の設計およびパラメーター化について説明します。モデルでは、Simscape Fluids™ で提供されているカスタムの膜・電極接合体 (MEA) ブロック `FuelCell.ssc`、および燃料電池のモデル化用に特別に設計されたカスタムの多種気体ドメインを利用します。

これは高分子電解質膜 (PEM) 燃料電池に基づいています。PEM 燃料電池は、低動作温度、低圧、および高効率であるため、モビリティ用途で最も広く利用されている燃料電池タイプです。モデルには、バランスオブプラントのコンポーネントも含まれています。

燃料電池モデルを使用する理由

従来型のハードウェア プロトタイプ代わりに燃料電池モデルを利用すると、設計段階全体で多くのメリットがあります。設計バリエーションの比較、トレードオフ検討の実施、コンポー

ネットの選定やサイジングを行い、目的の性能を実現できます。初期モデルを作成すれば、パラメーターを最適化し、最適な運用戦略を見出すことができます。

燃料電池モデルの用途

燃料電池モデルは、以下のような多くの用途に使用されます。

- コンポーネントの選定およびサイジング
 - さまざまな設計バリエーションを使用してトレードオフを検討
 - パラメーターおよび運用戦略を最適化
- 制御アルゴリズムの設計および妥当性確認
 - 熱および湿度をマネジメント
 - 圧力を制御
- 性能解析
 - バッテリーと燃料電池間のエネルギーフローを解析
 - ドライビング プロファイルを使用して FCEV の航続距離を予測

シミュレーションのメリットとして以下が挙げられます。

- 開発時間の短縮
- テスト条件の範囲拡大
- テストにかかるコストの削減

このようなモデルを使用することにより、ハードウェアを入手する前でも、システムとともに制御アルゴリズムおよびロジックを設計してその妥当性を確認できます。簡略化したモデルから開始し、全体的なシステムとともに制御手法を成熟させることができます。

システム設計が完了してその妥当性が確認されたら、コード生成を使用してコンポーネントを実装できます。MATLAB®、Simulink、および Stateflow は、任意のプロセッサ、FPGA、または PLC で実行できる、C/C++、HDL、およびストラクチャード テキストのコード生成の

機能を備えています。自動車アプリケーション用には特に、コード生成機能に AUTOSAR 互換のワークフローをサポートしています。

シミュレーション モデルを利用することで、ハードウェア プロトタイプを用いた場合には困難である危険な動作条件など、より幅広い燃料電池の動作条件を試すことができます。バッテリーと燃料電池スタック間のエネルギーフローの決定や FCEV の航続距離の推定など、燃料電池システムの全体的な性能を解析することもできます。シミュレーションから得られた洞察は、より優れたハードウェア プロトタイプの開発に役立ちます。これにより、有効性が向上し、テストにかかるコストを削減できます。

燃料電池モデルの定義

Simscape モデルでは、温度管理および加湿のための熱液体ドメインおよび混合気体の詳細な熱力学と拡散の特性に至るまで、燃料電池システムの振る舞いを把握することができます。

下のモデル (図 1) では、多種気体モデリング用にカスタムライブラリおよびカスタム Simscape ドメインを使用しています。膜・電極接合体は、Simscape 言語を使用して設計されたカスタム コンポーネントです。

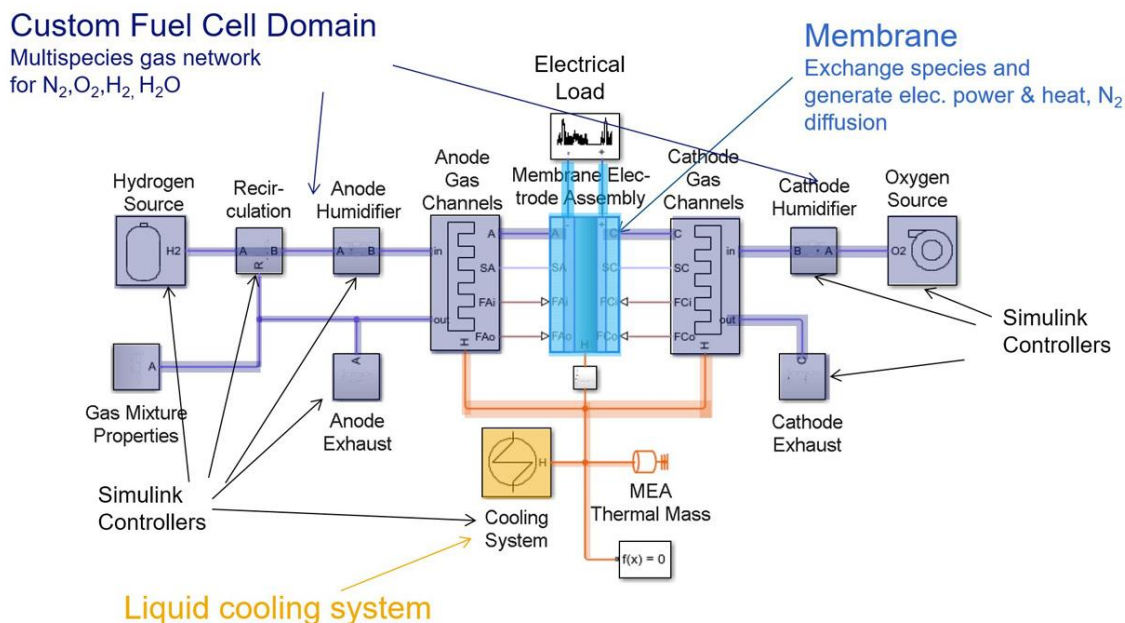


図 1. 膜モデルを含む、カスタム燃料電池ドメインを使用した燃料電池システム。

詳細については、次の例を参照してください。 [PEM 燃料電池システム](#)

薄紫で強調表示されているセクションは、カスタム燃料電池ドメインを表しています。これにより、多種気体ネットワークに起因する燃料電池システム特有の複雑性が解消されます。窒素 (N_2)、酸素 (O_2)、水素 (H_2)、水 (H_2O) という 4 種類の気体種から成る混合気体の熱力学および流体の特性を考慮する必要があります。

青で強調表示されている膜は、Simscape 言語で記述されています。この言語については、このホワイトペーパーの終わりの部分で簡単に説明します。膜モデルでは、ファラデーの法則、ネルンスト方程式、および膜に接続され、電池スタックから電力供給される電気負荷を用いて電気的な振る舞いを計算します。その特性は窒素の拡散も考慮します。これは、ページ手法の設計のために重要な機能であり、効率性と電力出力の最適化および必要なバッテリーサイズの決定のために必要になります。

オレンジ色は、熱マネジメントシステムを示しています。燃料電池スタックは、約 80 °C で動作させる必要があります。廃熱が生じます。そのため、バランスオブプラントでは、コールドスタート用にクーラー、熱交換器、ポンプ、およびヒーターを使用した熱マネジメントが必要になります。

図 1 に示されているように、燃料電池システムのコンポーネントの多くでは、異なるタイプのコントローラーが必要です。

燃料電池モデルのコンポーネント

Simscape には、さまざまな詳細度で燃料電池をモデル化するためのオプションが備わっています。後のセクションで、適切な詳細度の選択について説明します。さまざまな工学ドメインの個別のコンポーネントをそのコントローラーとともに正確にモデル化できます。

燃料電池の基本コンポーネントには以下のものがあります。

- 水素源
- 再循環システム
- 加湿器
- アノード
- 排気およびパージシステム

水素源

水素源は、燃料タンク、減圧バルブ、およびパイプで構成されます (図 2)。タンクは、一定体積チャンバー (モデル全体で使用される概念) を構成します。図 2 では、タンクブロックのパラメーターリストも示しています。タンクには水素のみが格納されるため、4 種類すべてをカバーしている初期モル分率 (赤のボックス) では、3 番目の種類である水素に対してのみ 1 が設定されています。種類の順序は固定で、窒素、酸素、水素、水の順です。モデリングプロセス全体でこのベクトルが使用されています。

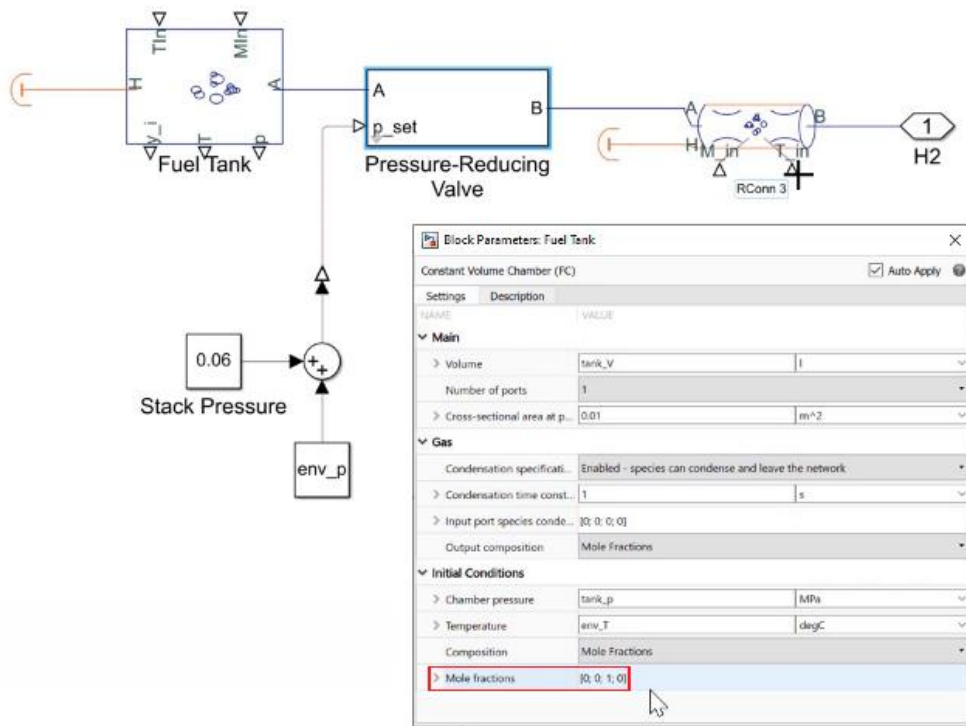


図 2. タンクと減圧バルブおよびコントローラー。

タンクは、特定の温度 (T_{In}) の外部からの質量流量 (M_{In}) を取り込みます。タンクには絶縁されている熱接続端子 (左の H)、および次の装置である減圧バルブに接続する端子 (A) があります。また、タンクには、圧力 (p)、温度 (T)、さらには対象となる 4 種類すべてのモル分率 (y_i) の測定出力もあります。接続されているバルブにより、タンク内の水素の圧力 (約 700 bar) が、燃料電池スタックで必要とされる 1.6 bar に減圧されます。バルブの端子 B は、パイプに接続されています。このパイプ要素は、質量流量 (M_{In}) および温度 (T_{In}) の入力と熱端子 (ここでは未使用) を備えています。

再循環

すべての水素がアノードで使用されるわけではないため、再循環 (図 3) をモデル化します。未使用の水素は、環境に排気するのではなく、再循環します。再循環要素は、3つの端子を備えた一定体積チャンバーです。端子 B にはインジェクターが接続されます。このインジェクターには、スタック (左下の i_stack) 上の電気負荷で使用される電流に応じて (R) から体積チャンバーの端子 (B) への流量を制御するコントローラーがあります。

再循環モデルにより、アノードから再循環される使用済みの気体と新しい水素の割合の変更による効率性への影響を確認できます。

後のセクションで、Simulink および Simscape を使用したシミュレーションにより、設計およびコントローラーの妥当性を確認できます。システムのハードウェアを試作する前に設計空間を徹底的に調べることができます。

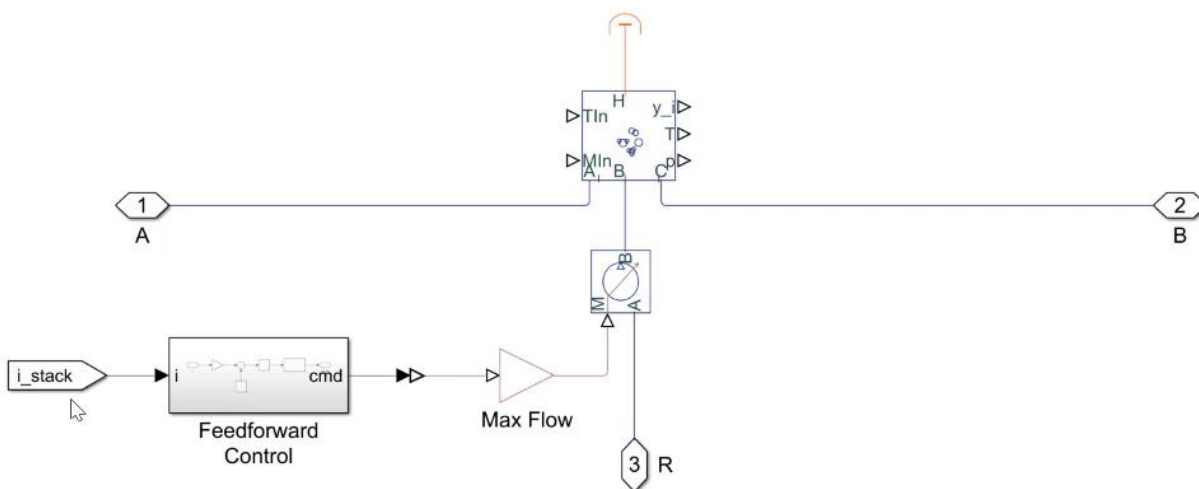


図 3. コントローラーおよびバルブを備えた再循環。

加湿器

アノード側の加湿器は、再循環システムの端子 (B) に接続されます (図 4)。動作中は膜を湿らせた状態に保つ必要があります。さもなければ、膜が損傷します。この状態を保つため、加湿器を用いて、 M_{in} を介してパイプに水蒸気を注入することで、アノードに入る混合気体の相対湿度を 100% に維持します。

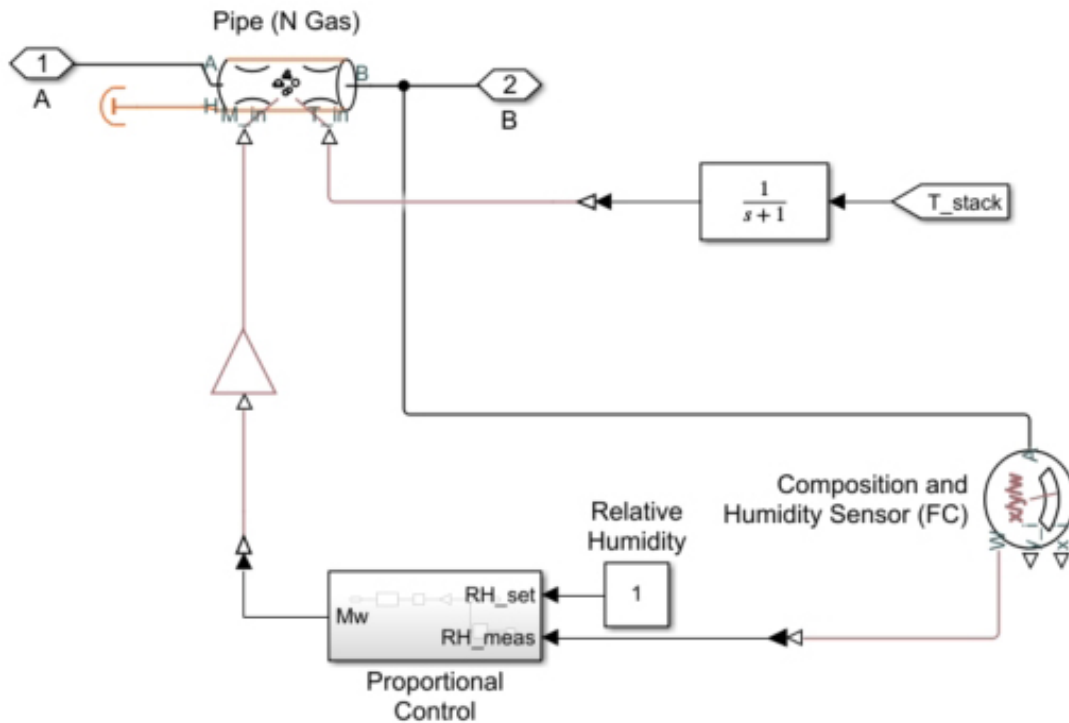


図 4. 成分および湿度センサーを含む加湿器。

膜に接続されている成分および湿度センサーは、すべての成分の質量分率 (x_i) とモル分率 (y_i) を測定します。必要に応じて、比例コントローラーが混合気体に水を加えます。質量流量 (M_{in}) に加え、伝達関数 (右上) により、現在の電池スタックの温度から、加える水蒸気の温度が決定されます。

アノード

アノード (図 5) の内部では、水素がプロトンと電子に分解され、化学的に酸化されます。プロトンは膜を通過してカソードに渡されます。電子が外部の電気回路に流れ、電流を発生させて、接続された負荷に電力を供給します。

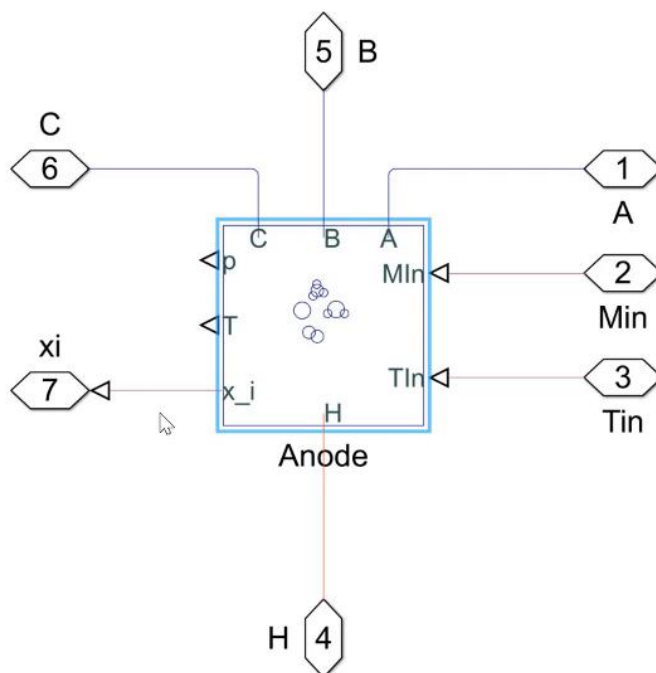


図 5. アノード気体チャネルサブシステム。

アノードも一定体積チャンバーとしてモデル化されます。アノードには端子 (C) に入力があり、気体が端子 (B) から排出されます。端子 (A) を使用して、膜における温度と圧力を読み取ります。この要素を介したフローはありません。膜からの流量は、端子 (Min) および (Tin) を使用して制御されます。端子 (H) は、冷却/加熱システムを使用して熱を交換します。端子 (x_i) は、個別の気体成分の質量分率を取得する役割を果たします。

排気およびパーズシステム

動作中は、プロトンおよび水に加えて、窒素が燃料電池膜を通過します。窒素がアノードに蓄積されるため、水素燃料の利用が減り、結果として電力出力が低下します。この影響を緩和するために、燃料電池システムではアノードで排気を利用してシステムをパーズします。

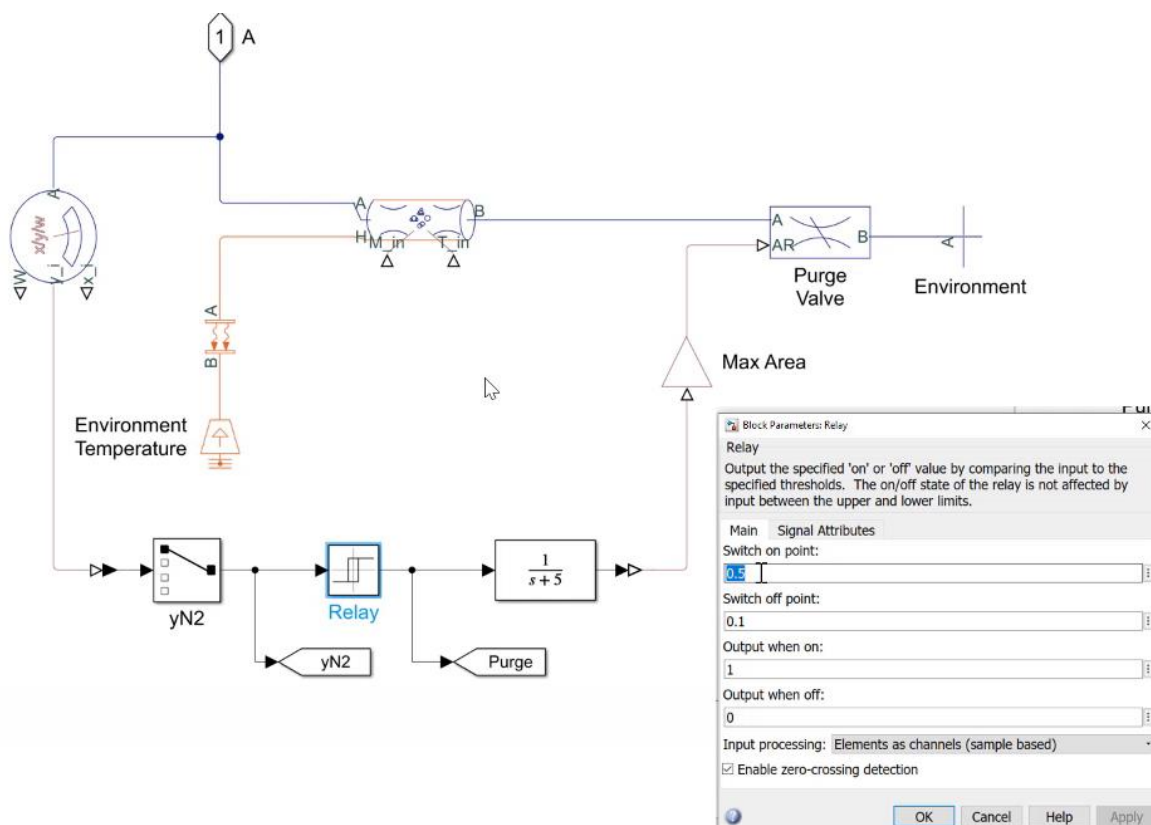


図 6. パージリレーを使用したアノード側の排気。

この例では、窒素レベルがモル分率 0.5 (図 6 の Relay ブロック パラメーターのスイッチオンポイント) に達すると再循環フローはパーズされ、0.1 (Relay ブロック パラメーターのスイッチオフポイント) に達すると停止します。パーズがオンの間、パーズバルブは完全に開いた状態になります。オフの間は、完全に閉じた状態になります。

制御手法の妥当性確認: パージの例

Simscape を使用して、このシステム内のコントローラー動作の妥当性を確認できます。Simscape は、シミュレーション中にすべてのブロックの出力を記録します。これらは Simscape 結果エクスプローラーで検査できます (図 7)。

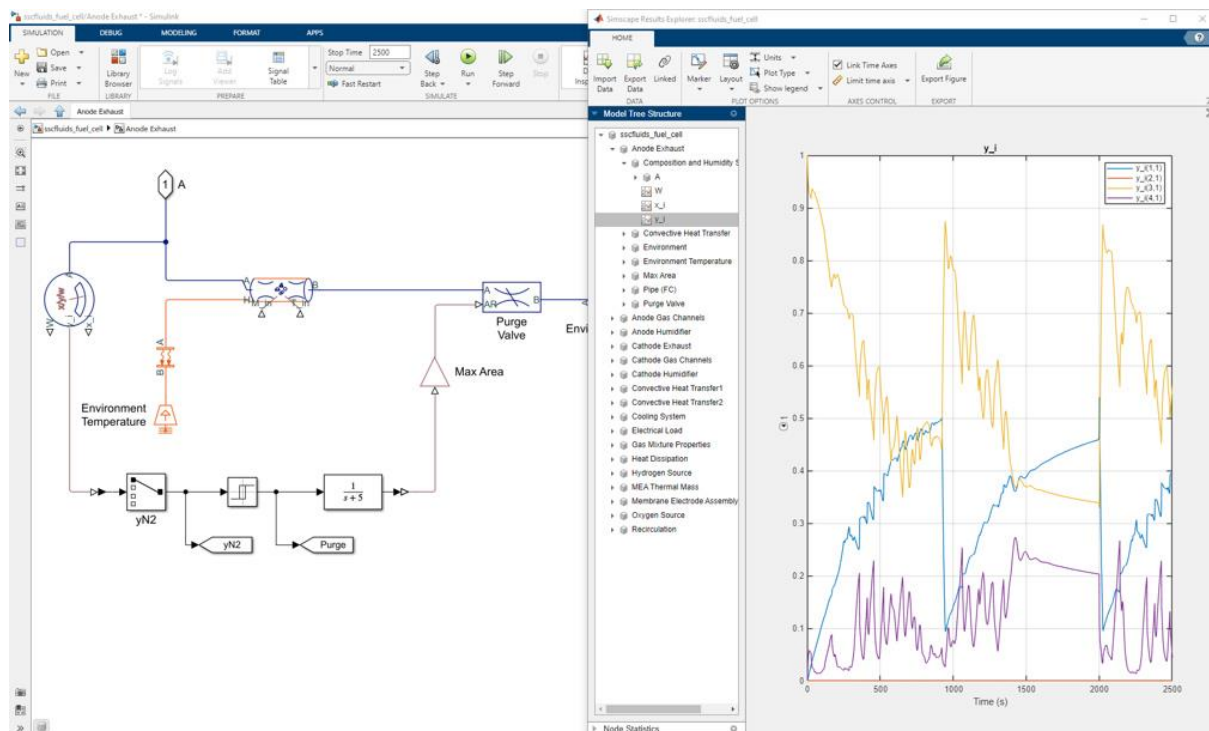


図 7. パージ要素 (左) と、Simscape 結果エクスプローラーでのシミュレーション結果。

ここでは、動作中におけるアノード排気システム内の成分および湿度センサーの端子 (A) での気体種のモル分率 (y_i) を確認します。開始時点では、窒素レベル (青の線) はゼロです。窒素レベルの上昇に伴い、水素分率 (黄色の線) が低下しています。期待どおり、窒素分率が 0.5 に達するとパージプロセスが開始し、0.1 に達すると停止しています。

また、水分率 (紫の線) が加湿器に制御されて変化していることもわかります。最後に、酸素分率 (オレンジの線) はゼロのままです。電池の同じ側に酸素と水素と一緒に存在しないよう

にしたいため、これで問題ありません。シミュレーション結果では、パーズ手法が機能しているかどうかを視覚的に確認し、それによってコントローラーの妥当性を確認します。

吸気

カソードブロック (表示されていません) は、図 5 に示されているアノードと同一の外観で、同じ端子と入力があります。その中で、反応物として酸素が外部電気回路を流れる電子を受け取り、膜からのプロトンと反応し、水が生成されます。

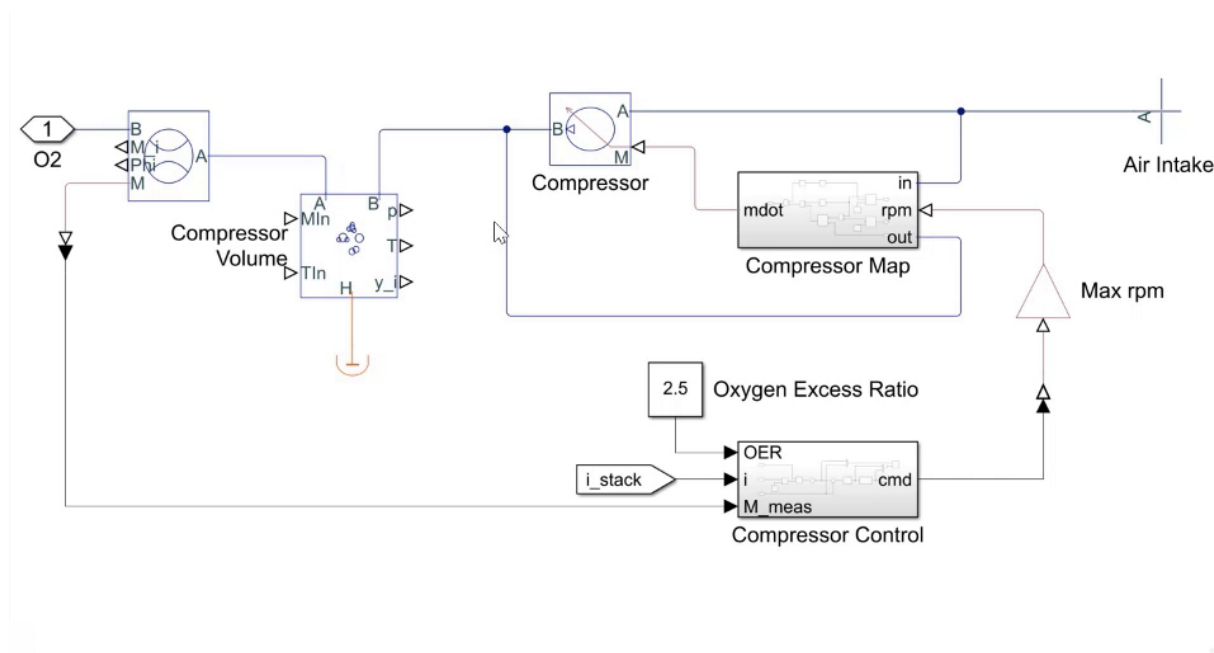


図 8. 吸気コンプレッサーとコントローラー。

また、燃料電池システムのカソード側は、周囲圧力の空気を取り入れるので、スタック内で必要な圧力に圧縮するコンプレッサーが必要となるため、アノード側とは異なります (図 8)。コンプレッサーは、電気負荷 (i_stack) から要求された電流を操作する独自のコントローラーを備えています。空気は容易に入手可能であるため、再循環およびパーズシステムは不要です。したがって、簡単な排気で十分です。

冷却システム

冷却システムはアノード、カソード、および膜に接続されます (図 9)。高効率であるため、液冷式を選択します。冷却システムは、タンク、ポンプ、熱交換器、ラジエーター、およびスタック温度を操作するポンプコントローラー (設定点は 80°C) で構成されます。

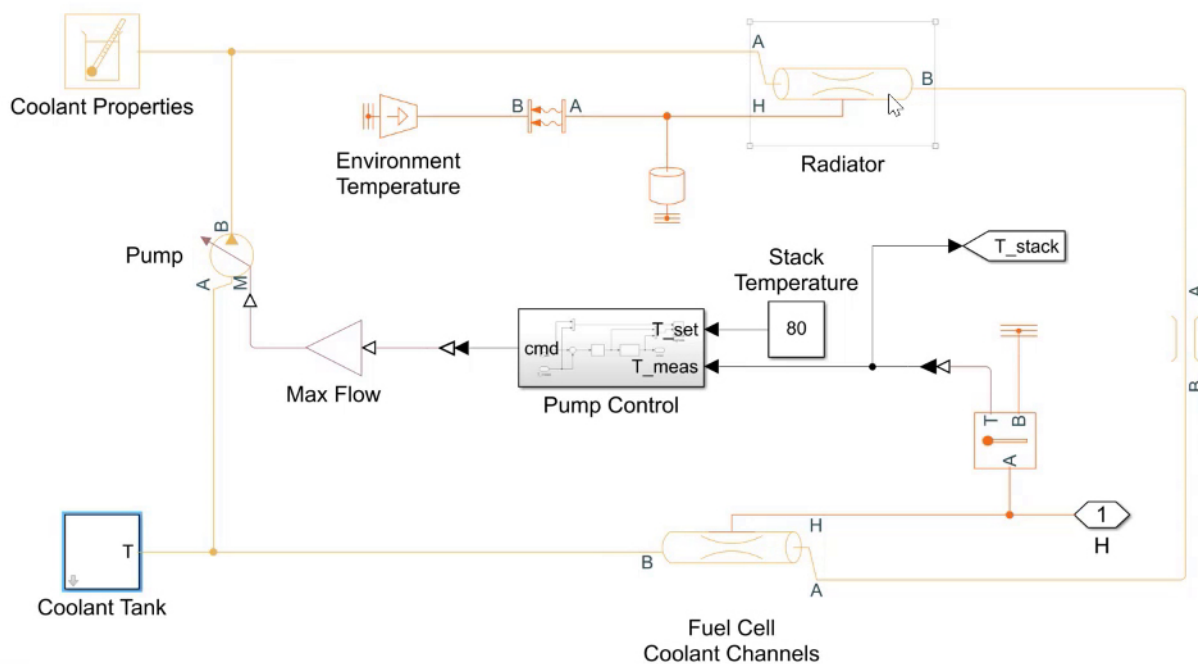


図 9. 液体冷却システム。

Simscape 言語: カスタム コンポーネントおよびドメインのモデル化

Simscape 言語を使用して独自のカスタム コンポーネントおよびドメインをモデル化できます。この言語は MATLAB に基づいており、その他のライブラリブロックと同様に使用できる Simscape ブロックの作成をサポートしています (図 10)。わかりやすさのために、ここではカスタム燃料電池ドメインの Local Restriction ブロックを例として取り上げます。

Example: Local Restriction within Fuel Cell Domain

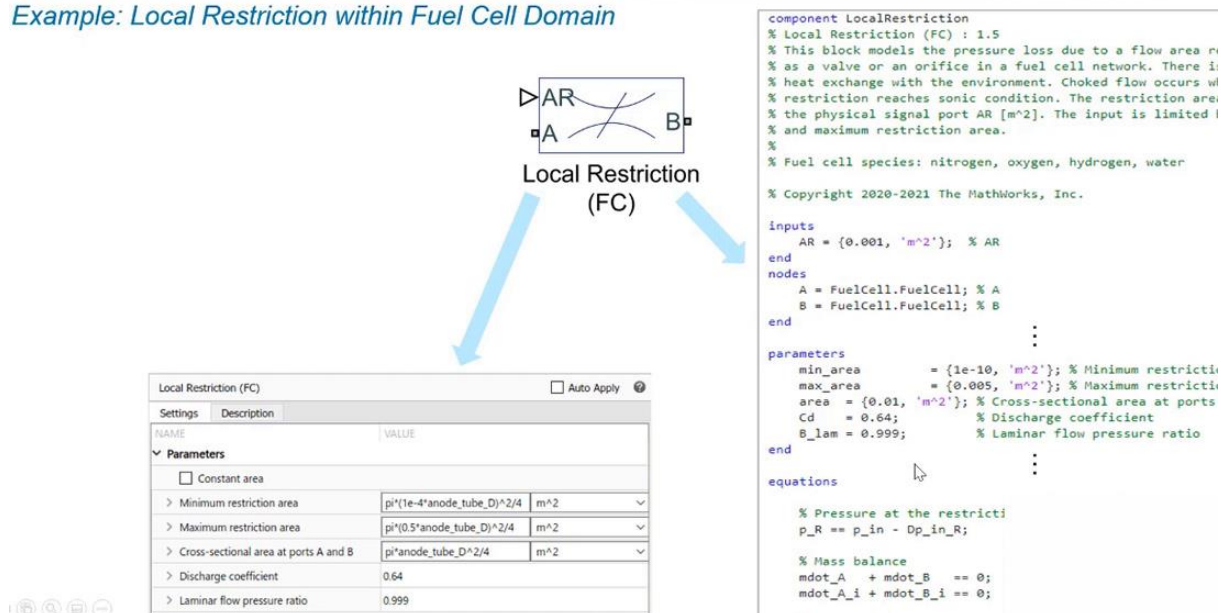


図 10. Simscape 言語を使用して作成された Local Restriction ブロック コンポーネント。

ソースコード (図 10 の右) は component または domain のいずれかから開始し、そのあとに名前が続きます。ブロックの説明の後に、コンポーネントの入力 AR、ノード (A と B)、およびパラメーターマスクを使用して設定パラメーター (左下) を含めることができます。

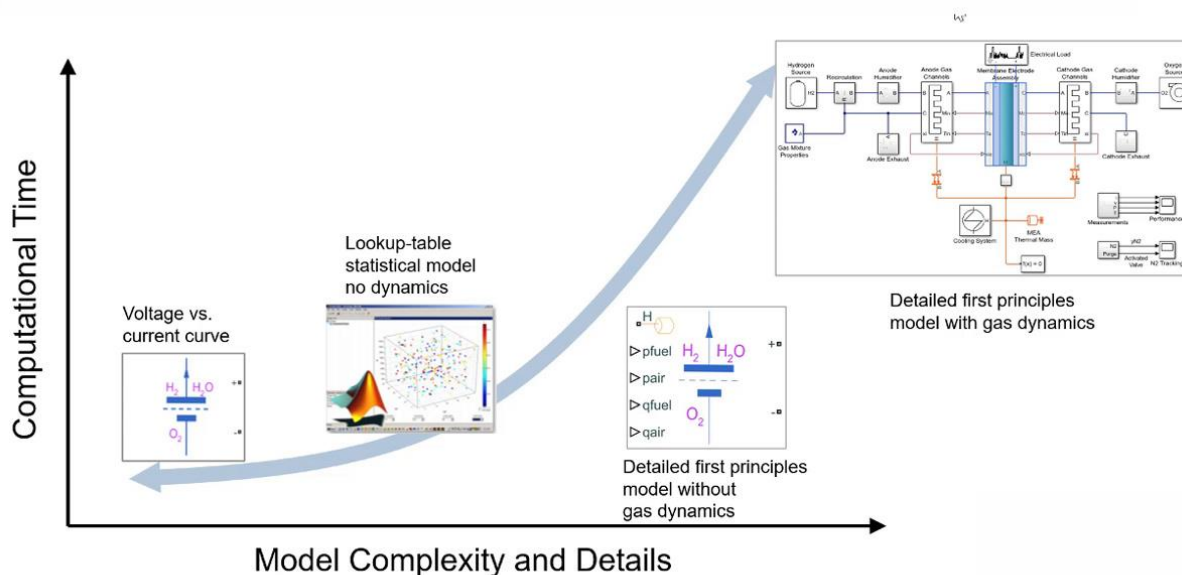
方程式は、カスタムブロックの重要な部分です。この例では、方程式は弁の絞り入力時の圧力や質量バランスなど、コンポーネントの動作を表しています。ブロックには、エネルギーバランスやその他の方程式を考慮することもできます。

パートナーと協業する場合やモデルおよびライブラリを配布する場合は、バイナリとして保存することで、知的財産をさらに保護できます。

Simscape のブロック: システムモデリングの詳細度の選択

ここで示しているモデルでは、完全な気体力学を用いた第一原理手法を使用しています。この詳細度は、コンポーネントのサイジング、制御設計、および妥当性確認、コントローラーの調整、あるいはシステムのブランチにおけるすべての気体種の濃度の特定に使用することができます。

アプリケーションによっては、個別のシミュレーションに時間がかかりすぎる、あるいは大まかな振る舞いを表現すればよいという理由で、これより低い詳細度が必要、あるいは十分である場合があります。そのような場合のために、Simscape Electrical™ では、電圧-電流動作を反映したシンプルな燃料電池ブロックを提供しています (図 11 の左下)。



🔍 🔄 📄 📌

図 11. モデルの複雑度に対する計算時間の増加。

Simscape Electrical は、第一原理に基づくより詳細なモデル (右から 2 番目)、およびルックアップテーブルに基づくダイナミクスを持たない統計モデル (左から 2 番目) も提供しています。ただし、後者を使用した場合、必要なデータを収集するために、広範囲に及ぶ測定が必要になります。

これらの複数のモデルが用意されているため、用途に応じて、詳細度およびシミュレーション速度の観点からニーズに最適なモデルを選択できます。また、詳細モデルからルックアップテーブルベースのモデルを抽出して利用することで、後の開発段階で精度を損なうことなくシミュレーションを高速化することもできます。並列化やクラウド コンピューティングなど、シミュレーションの高速化のための他の手法と組み合わせて、生産性を向上させ、開発時間を短縮できます。

まとめ

Simscape は、異なる詳細度で燃料電池をモデル化するためのオプションを提供しています。タンク、バルブ、燃料電池スタック、加湿器、コンプレッサーなど、異なる工学領域の個々のコンポーネントを、コントローラーとともに正確にモデル化することができます。

これらのモデルは、カスタムドメインやコンポーネントを用いて、混合気体の詳細な熱力学特性や拡散特性、温度マネジメントや加湿のための熱流体領域まで、燃料電池システム全体の挙動を把握することができます。

これらのシミュレーション モデルを使用して、コントローラーおよびロジックの設計、コンポーネント パラメーターの調整、妥当性確認、およびコード生成、統合の検討、およびシステムと制御パラメーターの最適化を行うことができます。

次のステップ

[燃料電池モデルに関する詳細を見る](#)

[Web セミナーを見る: 推進電動化のための燃料電池統合](#)