

令和3年12月1日 第2回シンビオ講演会

太陽光パネル・燃料電池・蓄電池より構成された分散型電力
供給システムのアベイラビリティ解析

—GO-FLOW手法によるループ構造システムの解析—

松岡 猛 (宇都宮大学)

mats@cc.utsunomiya-u.ac.jp



はじめに

- ◇ 再生可能エネルギーシステムの有効な活用は持続可能な社会の実現にとり大変重要です[1]。
- ◇ 再生可能エネルギーとは、太陽光や風力など、常に自然界に存在するエネルギーのことです。
- ◇ 主なエネルギー源として“太陽光”、“風力”、“水力”、“地熱”、“バイオマス”、“波力”、“潮流”が挙げられます。
- ◇ これらは地球温暖化の原因となるCO₂を排出せず、環境にやさしいエネルギー源として注目を浴びて各国で開発導入が進められています。

はじめに(続き)

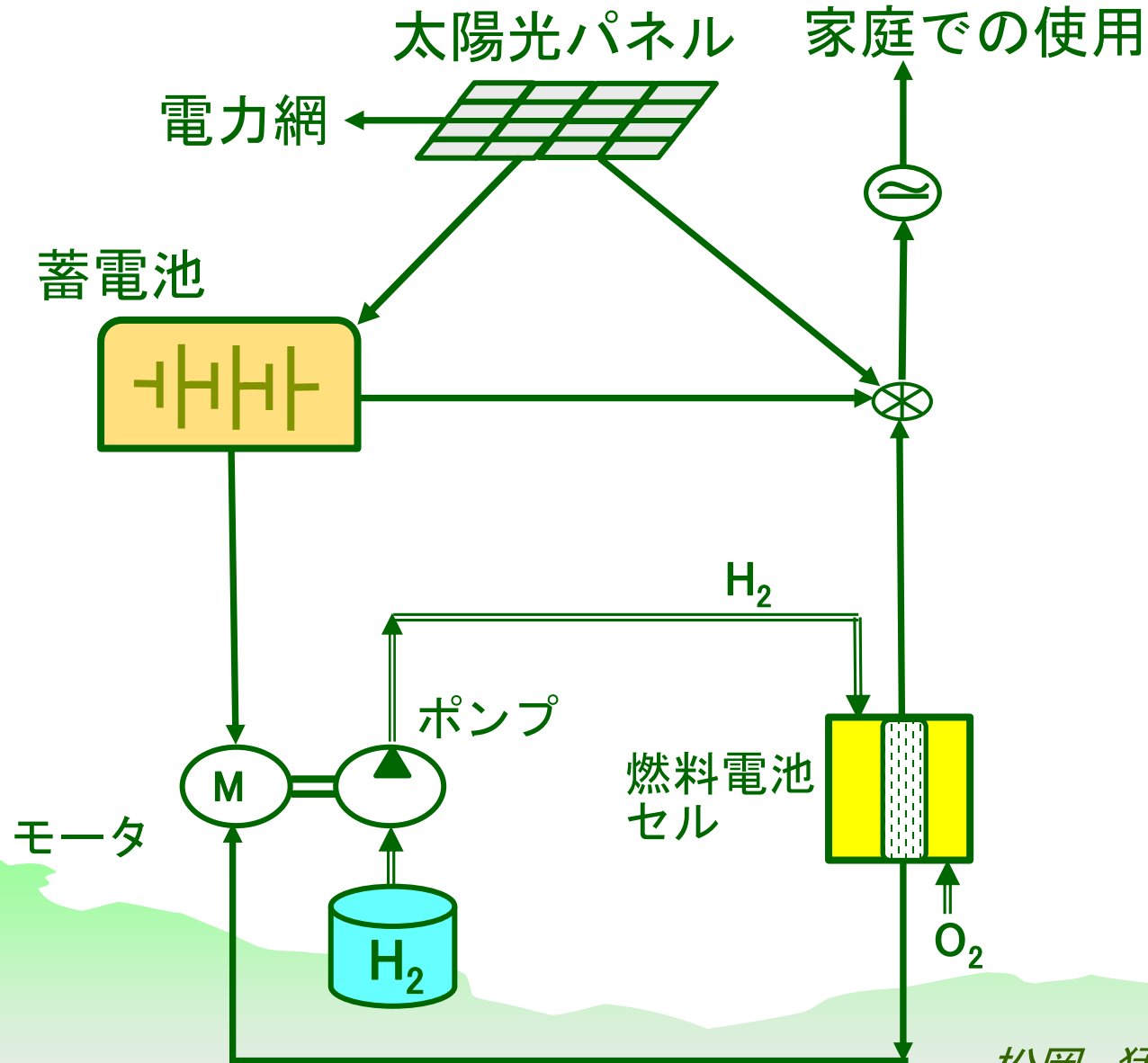
- ◇ 石炭や石油, 天然ガスなどの資源に限りのある化石燃料とは異なり,
 - ✓ “資源が枯渇しない”、
 - ✓ “どこにでも存在する”、
 - ✓ “CO2を排出しない”という特徴を持っています。
- ◇ 再生可能エネルギーは小規模発電所／分散型電源となる場合がほとんどです。
- ◇ 大規模発電所と比較すると小規模であり, 必然的に分散する性質があります。

はじめに(3)

- ◇ 万が一災害などによりいくつかのエネルギー供給所が運転停止しても、全体への影響は微弱になり、需給バランスを維持できる可能性が高まります。
- ◇ 太陽光発電を活用した電力供給システムとして、**太陽光パネル・燃料電池・蓄電池**より構成された分散型電力供給システムのアベイラビリティ解析を実施しました。
- ◇ このシステムがどれだけ安定的に電力を供給できるか数値的に解析したものです。

太陽光パネル・燃料電池・蓄電池より 構成された分散型電力供給システム

- ✧ 太陽光発電は天候に左右され常時電力を供給できるわけではありません。
- ✧ これを補完するために蓄電池が使用されますが、蓄電容量には限界があり枯渇してしまう場合があります。
- ✧ 一方、燃料電池による発電では発電量は貯蓄された燃料(H₂ガス)に依存しており長時間の電力供給も可能となります。
- ✧ 但し、燃料電池は出力変動に対する追従性に劣ります。



☆ 太陽光パネル

- ◆ 家庭への電力供給を行う。(夜間、曇天時は発電できない)
- ◆ 蓄電池への充電を行う。
- ◆ 余剰電力は電力網へ売電する。

☆ 蓄電池

- ◆ 余剰電力を貯める。
- ◆ 夜間および太陽光パネルの発電量が十分でない場合電力供給を行う。
- ◆ 燃料電池の起動用の電力を供給する。

☆ 燃料電池

- ◆ 太陽光パネル、蓄電池ともに電力供給できない時に使用。
- ◆ 蓄電池の電力で運転を開始すると自力で運転を継続できる。
- ◆ ループ構造を持ったシステムです。

各要素の性能・条件

以下の数値的な条件を設定して解析を進めました。

✧ 家庭での電力消費量

- ◆ 平均一日当たり10kwh使用する。

✧ 太陽光パネル

- ◆ 晴天時、家庭の電力消費と蓄電池の充電を同時に実施できる。

✧ 蓄電池

- ◆ 完全充電されるためには2日間要する。

✧ 燃料電池

- ◆ 家庭での消費電力をまかなえる。
- ◆ 運転中のみ故障が進展する。

仕様のまとめ

機器	容量	寿命	故障率	故障モード
太陽光パネル	最大 20kWh/day	30年	3.8E-6/h	故障
蓄電池	20kWh	10年	1.14E-5/h	故障
燃料電池セル	10kWh/day	60,000時間	1.67E-5/h	故障
モータ		50,000時間	2E-5/h 1.1E-4/D	運転中の故障 起動失敗
ポンプ		50,000時間	2E-5/h	運転中の故障
H ₂ タンク			1.2E-7/h	漏れ、詰まり
O ₂ 流れ			1E-8/h	詰まり
DC-AC インバータ			2.8E-7/h	故障

アベイラビリティ(使用可能性)の解析

- ◇ システムがどのくらいの割合、使用可能であることを示す量にアベイラビリティがあります。
- ◇ 寿命全体にわたっての割合で示す場合もありますが、ここでの解析では時間を追って変化するアベイラビリティを求めました。
- ◇ システムを構成する機器の故障発生によりアベイラビリティは低下します。
- ◇ 太陽光の条件、蓄電状況、運用状況によっても影響されます。
- ◇ 複雑な条件を考慮するためにGO-FLOW手法を用いました。

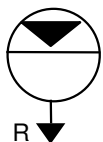
GO-FLOW手法

- 松岡[2]によって開発された成功確率を追うシステム信頼性解析手法
- システムを構成する機器を標準のオペレータでモデル化
- 機器の接続関係を信号線により表現し、GO-FLOWチャートを作成する
- GO-FLOWチャートとシステムのフロー・ダイアグラムが対応。

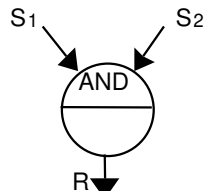
Type 21
Two-State Component



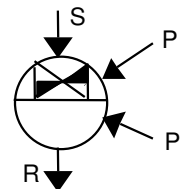
Type 25
Signal Generator



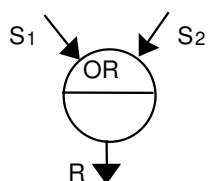
Type 30
AND Gate



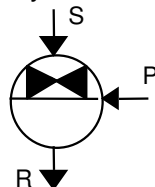
Type 39
Opening and Closing Action



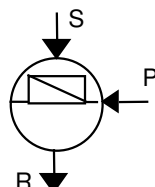
Type 22
OR Gate



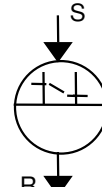
Type 26
Normally Closed Valve



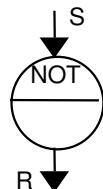
Type 35
Failure of Light Bulb



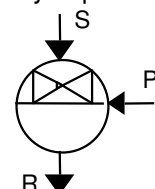
Type 40
Phased Mission Operator



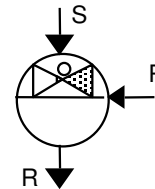
Type 23
NOT Gate



Type 27
Normally Open Valve



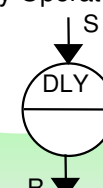
Type 37
Failure of Valve in Open State



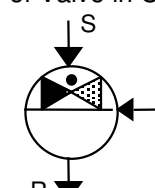
Type 24
Difference Operator

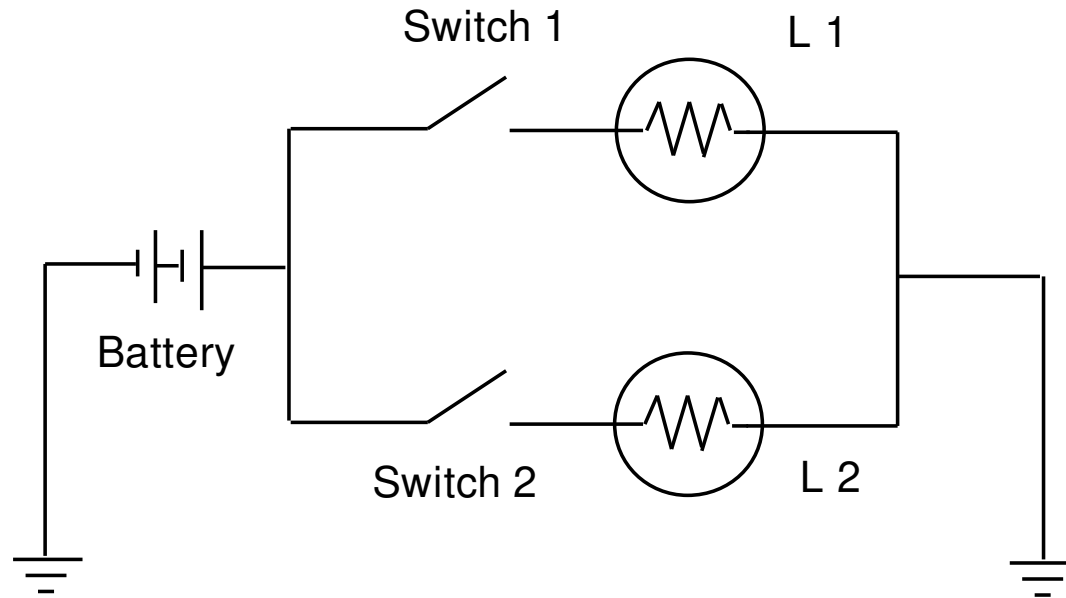


Type 28
Delay Operator

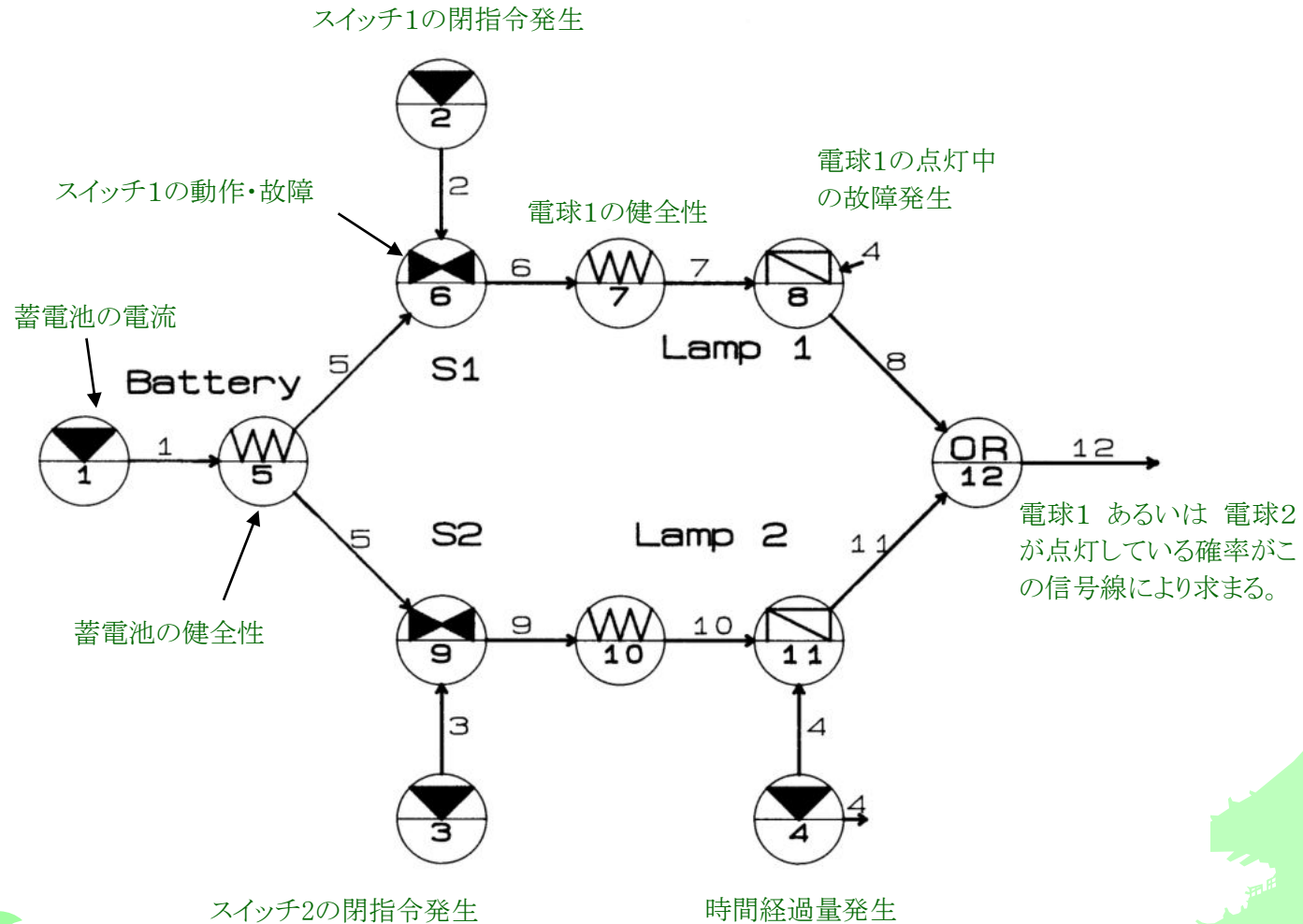


Type 38
Failure of Valve in Closed State





サンプル回路図



サンプル回路のGO-FLOWチャート図

解析の手順

- GO-FLOWチャートの作成
- 時間推移による状態変化を記述するためタイム・ポイントを定義
- 故障率データ、機器動作タイミング等の割り付け
- 解析プログラムの実行(チャート作成ツールの1つのメニューとなっている)
- 解析結果まとめ

GO-FLOW手法でできること

- 基本解析機能
- 不確かさ解析
- 一つの原因で同時に多数の機器が故障する共通原因故障解析
- 共通原因故障を考慮した不確かさ解析
- システムの動的挙動の解析が容易
- システムに要求される使命が段階を追って変化するフェイズド・ミッション問題の解析が容易

- GO-FLOW解説書、1996
- GO-FLOWプログラム・パッケージの販売開始、1996

GO-FLOWホーム・ページ

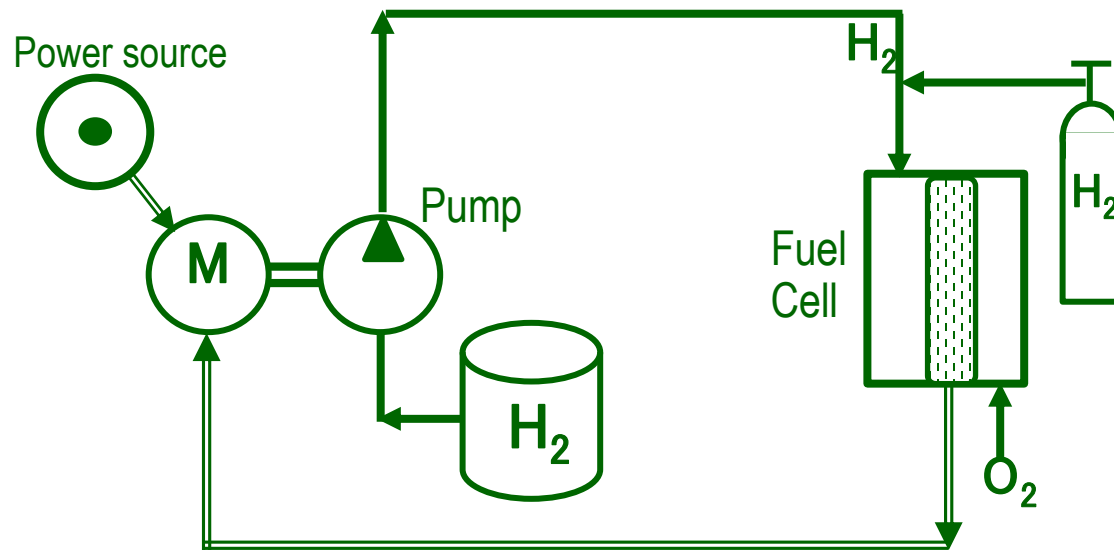
<http://mats121.world.coocan.jp/goflowj0.htm>

確率論的安全評価手法によるタイタニック号事故解析ホームページ

<http://mats121.world.coocan.jp/titanic.htm>



燃料電池システムの特徴

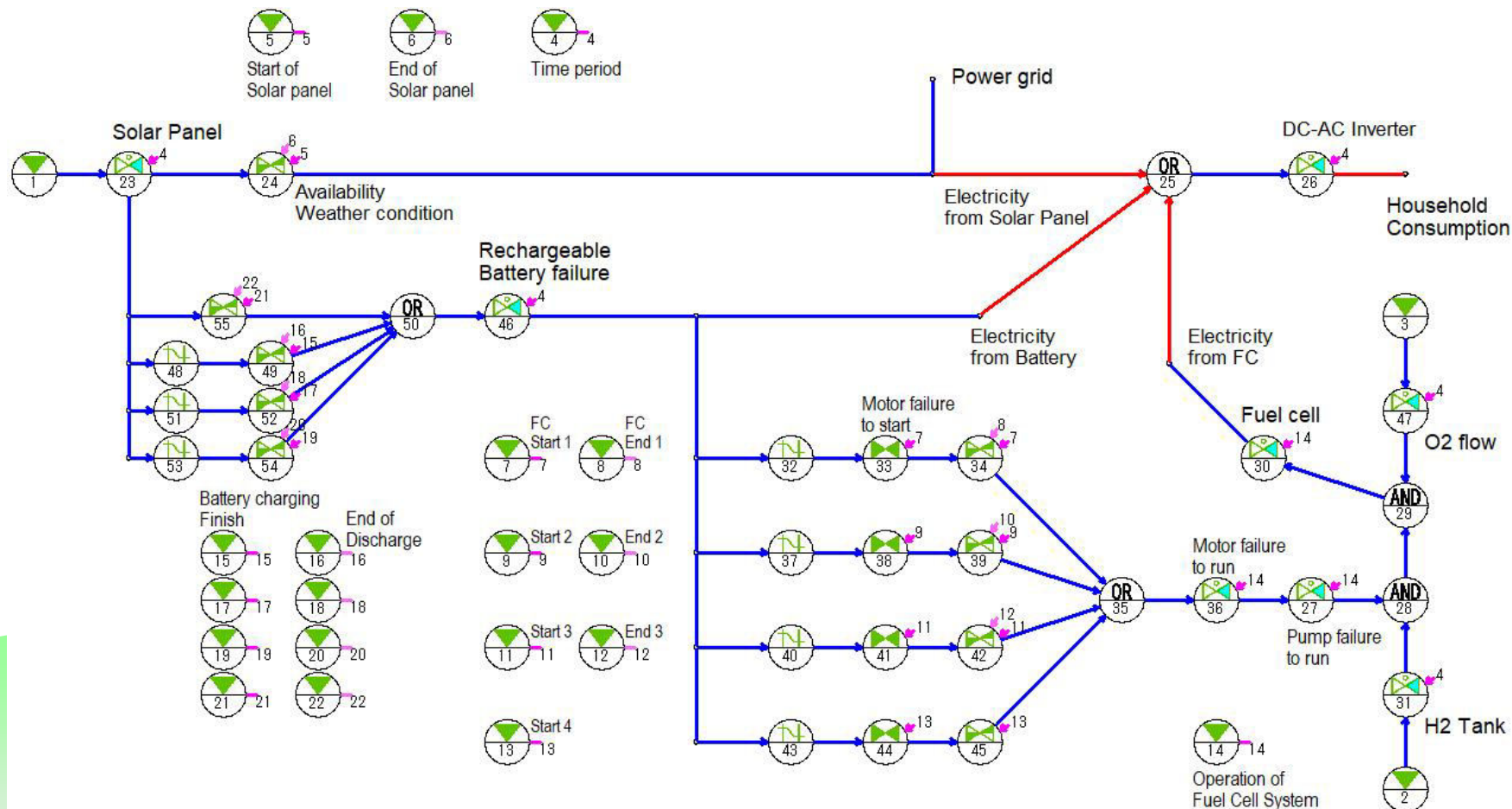


- ✧ 各構成機器の動作を互いに支援しあうループ構造を持っている。
- ✧ 自動車のエンジンと点火プラグの関係、原子力プラントシステム内にもループ構造がみられる。

ループ構造を持ったシステムの信頼性解析

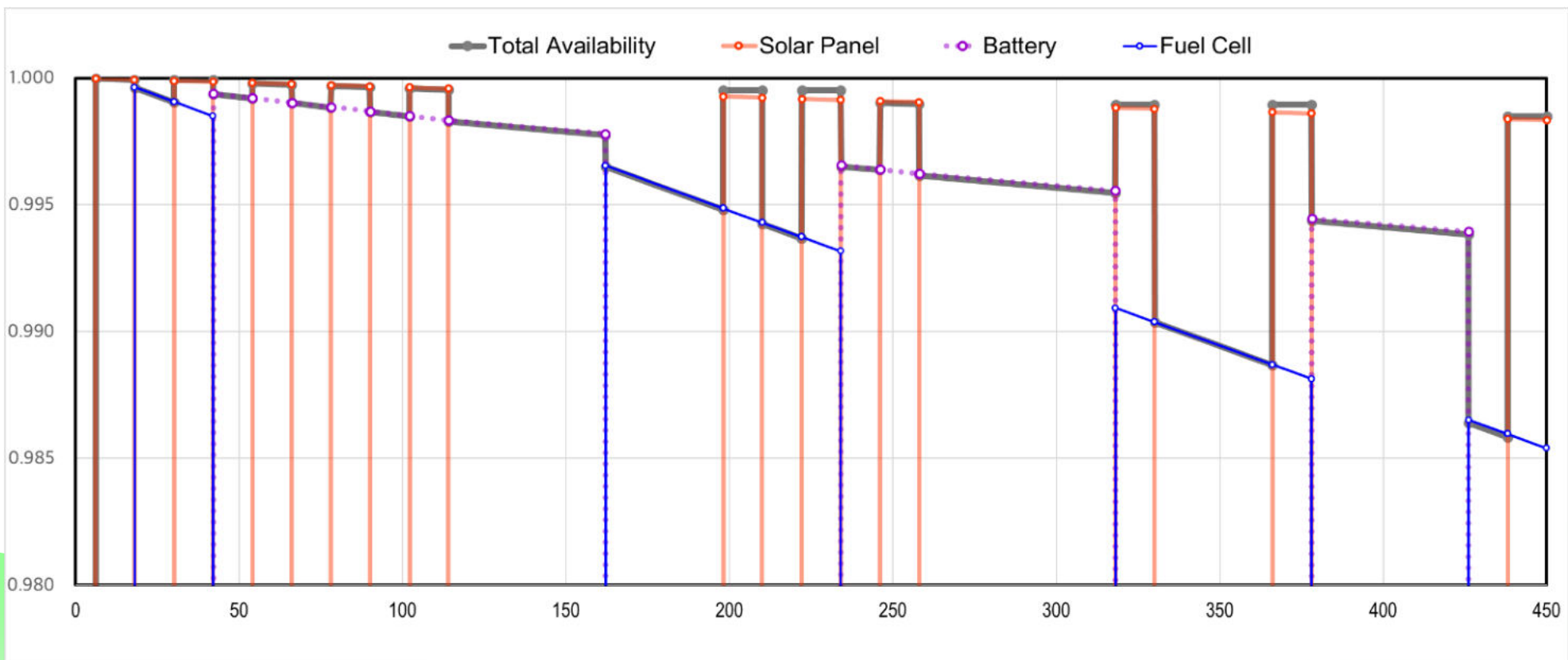
- ◇ 長年にわたり厳密に解くことが難しく、各種近似方法が提案されていた。
- ◇ 松岡[3]により厳密的な解法が示された。
- ◇ フォールトツリーがフィードバックループを持った場合についての解析手順が示された[4]。
- ◇ GO-FLOW手法でもこの解法が組み込み可能である。

太陽光パネル・燃料電池・蓄電池より構成されたシステムのGO-FLOWチャート



Day	Time(h)	Solar Panel	Rechargeable Battery	Fuel cell	to Householed consumption
1st day	0	0.0	0.0	0.0	0.000000
Dawn	6	0.0	0.0	0.0	0.000000
Sunrise	6	0.999978	0.0	0.0	0.999976
Sunset	18	0.999933	0.0	0.0	0.999928
Dusk	18	0.0	0.0	0.999623	0.999618
2nd day Dawn	30	0.0	0.0	0.999058	0.999050
Sunrise	30	0.999889	0.0	0.999058	0.999925
Sunset	42	0.999845	0.0	0.998493	0.999921
Dusk	42	0.0	0.999383	0.0	0.999371
3rd day Dawn	54	0.0	0.999207	0.0	0.999191
Sunrise	54	0.999800	0.999207	0.0	0.999785
Sunset	66	0.999756	0.999030	0.0	0.999737
Dusk	66	0.0	0.999030	0.0	0.999012
4th day Dawn	78	0.0	0.998854	0.0	0.998832
Sunrise	78	0.999711	0.998854	0.0	0.999690
Sunset	90	0.999667	0.998678	0.0	0.999642
Dusk	90	0.0	0.998678	0.0	0.998653
5th day Dawn	102	0.0	0.998502	0.0	0.998473
Sunrise	102	0.999623	0.998502	0.0	0.999594
Sunset	114	0.999578	0.998326	0.0	0.999546
Dusk	114	0.0	0.998326	0.0	0.998294
7th day Sunset	162	0.0	0.997799	0.0	0.997753
Dusk	162	0.0	0.0	0.996543	0.996498
9th day Dawn	198	0.0	0.0	0.994854	0.994799
Sunrise	198	0.999268	0.0	0.994854	0.999521
Sunset	210	0.999223	0.0	0.994291	0.999517
Dusk	210	0.0	0.0	0.994291	0.994233
10th day Dawn	222	0.0	0.0	0.993729	0.993667
Sunrise	222	0.999179	0.0	0.993729	0.999513
Sunset	234	0.999135	0.0	0.993167	0.999510
Dusk	234	0.0	0.996566	0.0	0.996501
11th day Dawn	246	0.0	0.996390	0.0	0.996366
Sunrise	246	0.999090	0.996390	0.0	0.999021
Sunset	258	0.999046	0.996215	0.0	0.998974
Dusk	258	0.0	0.996215	0.0	0.996143
14th day Dawn	318	0.0	0.995557	0.0	0.995469
Sunrise	318	0.998824	0.0	0.990925	0.998955
Sunset	330	0.998780	0.0	0.990365	0.998951
Dusk	330	0.0	0.0	0.990365	0.990362
16th day Dawn	366	0.0	0.0	0.988686	0.988673
Sunrise	366	0.998647	0.0	0.988686	0.998939
Sunset	378	0.998602	0.0	0.988127	0.998935
Dusk	378	0.0	0.994459	0.0	0.994354
18th day Sunset	426	0.0	0.993934	0.0	0.993815
Dusk	426	0.0	0.0	0.986510	0.986392
19th day Dawn	438	0.0	0.0	0.985952	0.985831
Sunrise	438	0.998381	0.0	0.985952	0.998477
Sunset	450	0.998336	0.0	0.985395	0.998473

解析結果



まとめ

- 再生可能エネルギーの活用にとり有望である太陽光パネル・燃料電池・蓄電池より構成された分散型システムのアベイラビリティ解析を実施しました。
- このシステム内にある燃料電池はループ構造を持っている。
- 複雑な運転条件を考慮するためGO-FLOW手法を用いて解きました。
- このような複雑なシステムの各種要因を考慮した解析例として紹介しました。
- この解析方法を活用ご希望のある方にはご相談に応じます。

参考文献

- [1] United Nations. *Progress towards the Sustainable Development Goals Report of the Secretary-General*, 2017
- [2] Matsuoka T. and M.Kobayashi. *GO-FLOW A New Reliability Analysis Methodology*. *Nuclear Science and Engineering* 1988;98: 64-78.
- [3] 松岡猛、ブール代数方程式による論理ループ構造の信頼性解析、*日本信頼性学会誌* 第32巻5号 pp.377-395(2010)
- [4] Takeshi Matsuoka, *Procedure to solve mutually dependent Fault Trees (FT with loops)*, *Reliability Engineering and System Safety*, (October 2021);<https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107667>