



レジリエントICT研究シンポジウム

光ネットワーク間の連携方策

レジリエントICT研究シンポジウム
ネットワーク研究所レジリエントICT研究センター
ロバスト光ネットワーク基盤研究室

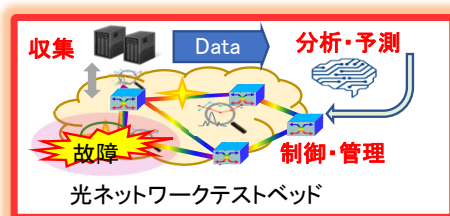
淡路祥成

R7年11月6日

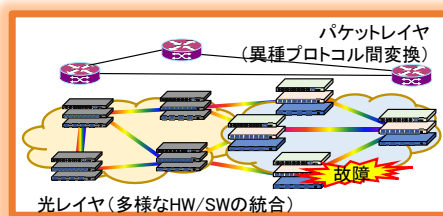
光ネットワーク間の連携方策によるレジリエンシー強化

五カ年の3つの柱

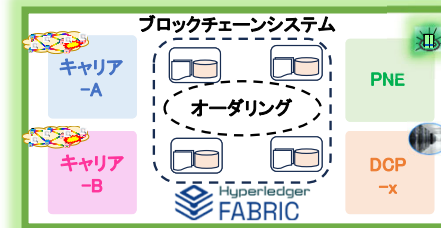
光ネットワークの障害予兆検知に向けた模擬障害情報の収集と活用



ネットワーク資源のオープン化による相互接続基盤技術



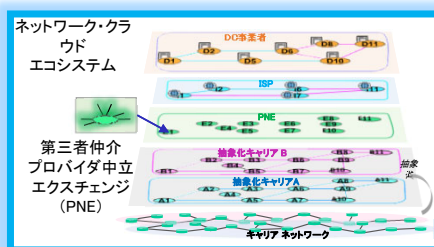
情報共有・需給マッチング:
通信と計算基盤連携復旧



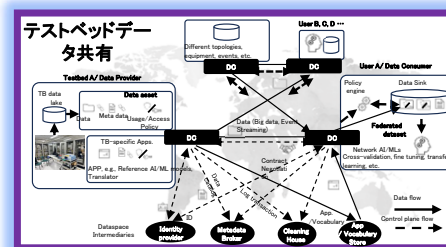
日米連携(JUNO3)

日独B5G連携

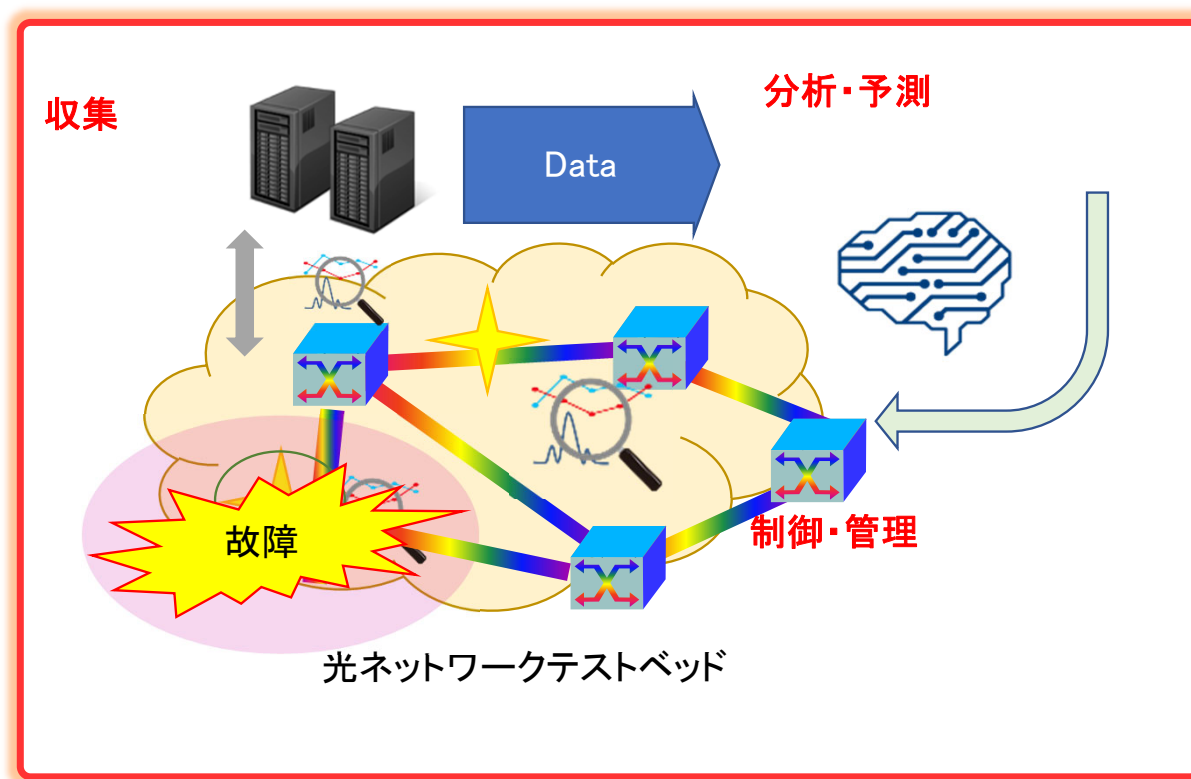
クラウド・通信キャリア連携に基づく超信頼・高効率なプログラマブル基幹ネットワーク



国際的な光ネットワークテストベッド
データ共有



光ネットワークの障害予兆検知に向けた模擬障害情報の収集と活用



NICT 光ネットワークにおける障害管理とデータ連携

- 障害管理は将来の光ネットワークにおいて重要課題の一つ [A1, A2]

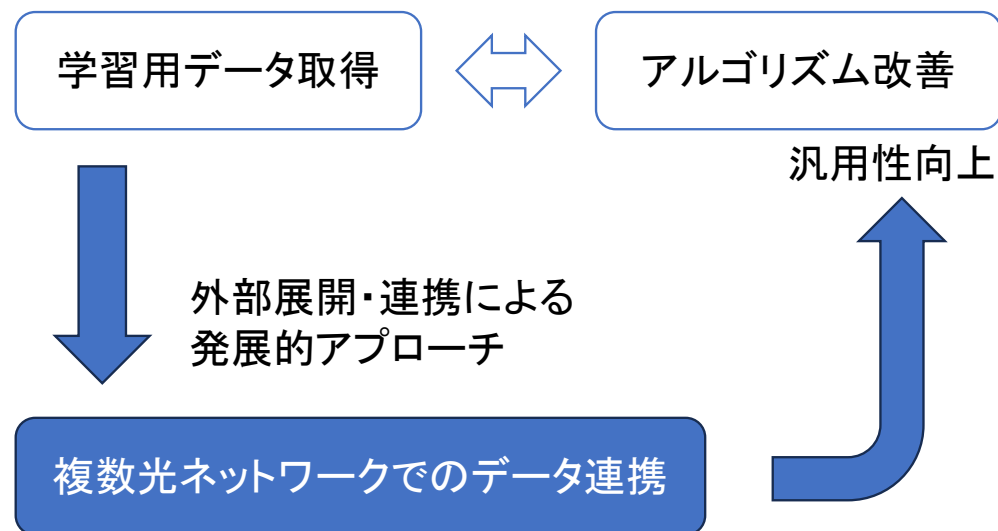
- 近年、機械学習を用いた手法が研究されている
 - 機械学習による障害検知 [A3]
 - 機械学習による障害同定 [A4]

- NICTレジリエントICT研究センターでのリモートラボ・小規模テストベッドの活用

- **(懸案) データソースが限定的**であることから過学習への懸念や汎用性がない可能性

- ⇒ データスペースによるデータ連携への展開

基本アプローチ



出典

[A1] F. Musumeci, "Machine Learning for Failure Management in Optical Networks," OFC, Th4J.1, 2021.

[A2] S. Xu et al., "Quick OPM recreation and robust telemetry in emergency optical networks for early disaster recovery," ECOC, M.1.E.2, 2019.

[A3] F. Musumeci et al., "A Tutorial on Machine Learning for Failure Management in Optical Networks," IEEE/OSA JLT, 37(16), 2019.

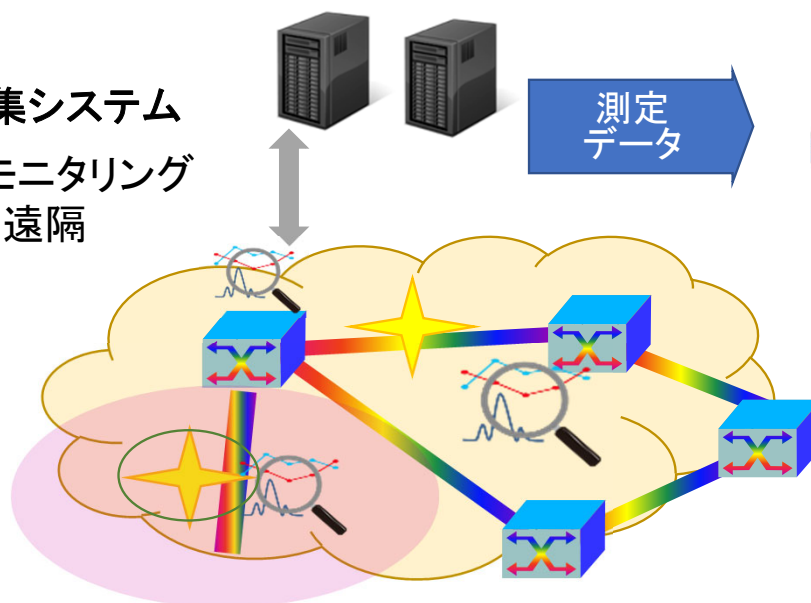
[A4] F. Musumeci et al., "Transfer Learning across Different Lightpaths for Failure-Cause Identification in Optical Networks," ECOC, Mo2K-1, 2020.

光ネットワークにおける障害検知・同定・予測スキーム

- 潜在的な故障源などを検知・予測するテレメトリ技術
- 光ネットワークの性能低下を防止する適応制御・管理の基盤技術

A テレメトリ情報収集システム

- 光信号特性の長期モニタリング
- 障害環境を考慮した遠隔テレメトリ技術



B 障害予兆の情報分析

- 障害種別・位置・波及範囲などの予測・推定技術

C 障害事前対応ネットワーク制御

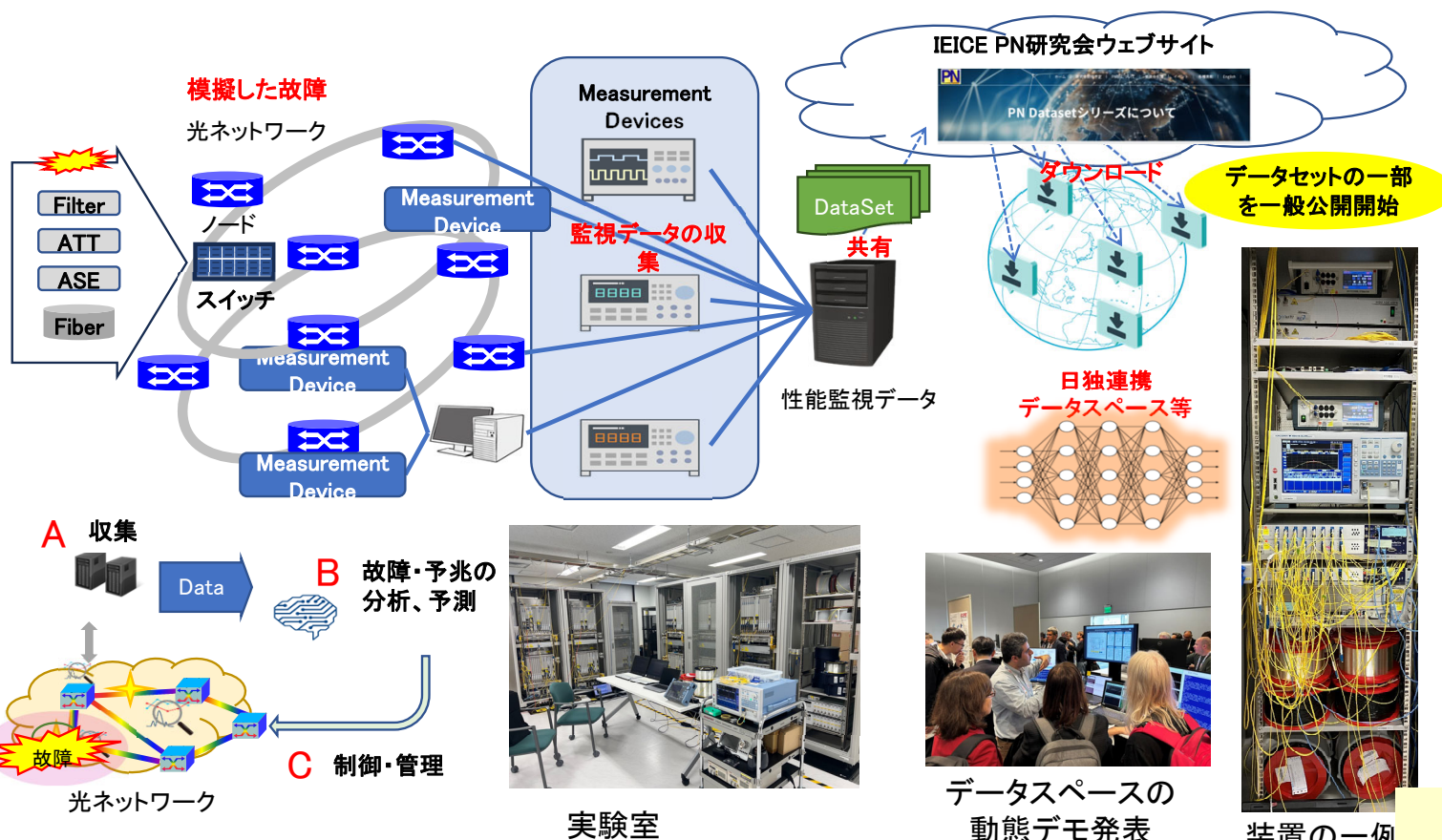
- 光パス切り替え/代替光パス設立制御
- 故障修復の準備/計画立案

特徴

- 商用サービスで使われるコモディティ機器を集めた光ネットワークを構築し、研究に利用(一般的には入手困難な商用グレード光通信設備での実験データ)

光ネットワークの障害予兆検知に向けた模擬障害情報の収集と活用

中長期計画: 大規模障害や災害等に対して、広域トランスポートネットワークに影響をもたらす、光ファイバ網特有の物理現象に由来する潜在的な故障源等を検知・予測するテレメトリ技術と、性能低下抑制のための適応制御の基盤技術を確立する。



目的:

- ・潜在的な故障源の早期発見
- ・ネットワーク性能の維持・向上

実施内容:

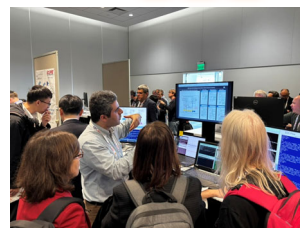
- ・テレメトリ情報収集システム開発
- ・障害検知・同定・予兆検出
- ・アルゴリズム開発
- ・性能低下抑制制御実証
- ・データ共有フレームワーク構築

成果:

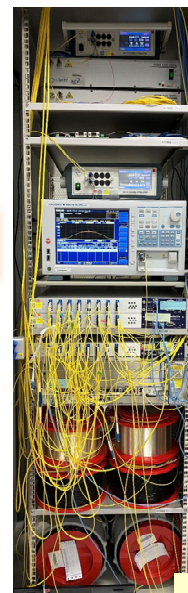
- ・AI/ML開発用データセットの一般公開
- ・国際会議発表(招待講演含む)
- ・国際連携の促進



実験室



データスペースの
動態デモ発表
(OFC2025)

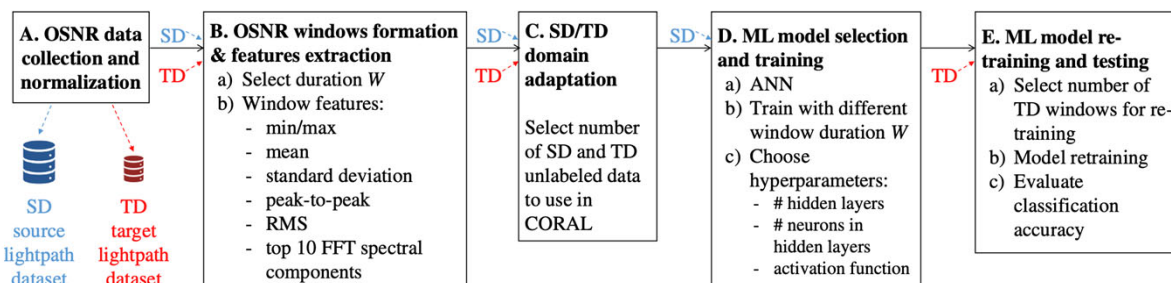


装置の一例

電子情報通信学会PN研
ウェブサイトにてデータセット一般公開中

NICT 転移学習による障害検知・同定

- OSNRの時系列データを用いた機械学習による障害検知・同定 [1]
 - 課題:「学習」に多くのデータと計算が必要
- ↓
- 転移学習(ドメイン適応)による学習の効率化

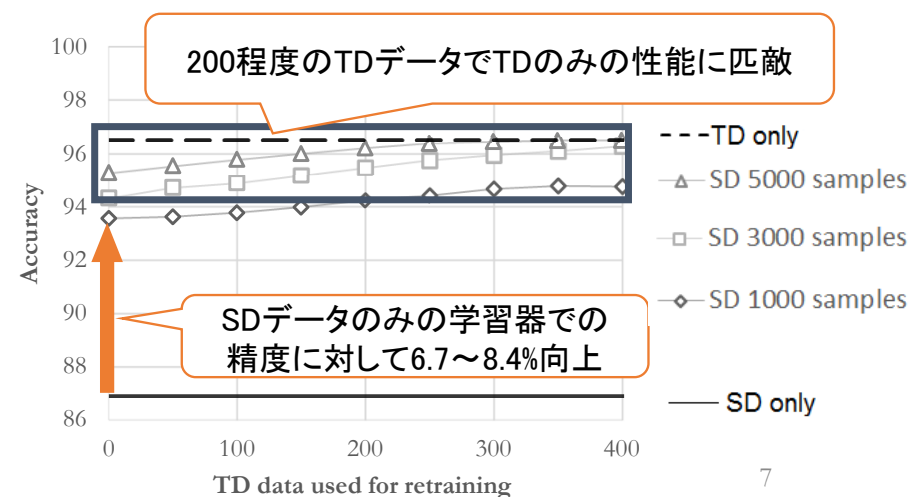
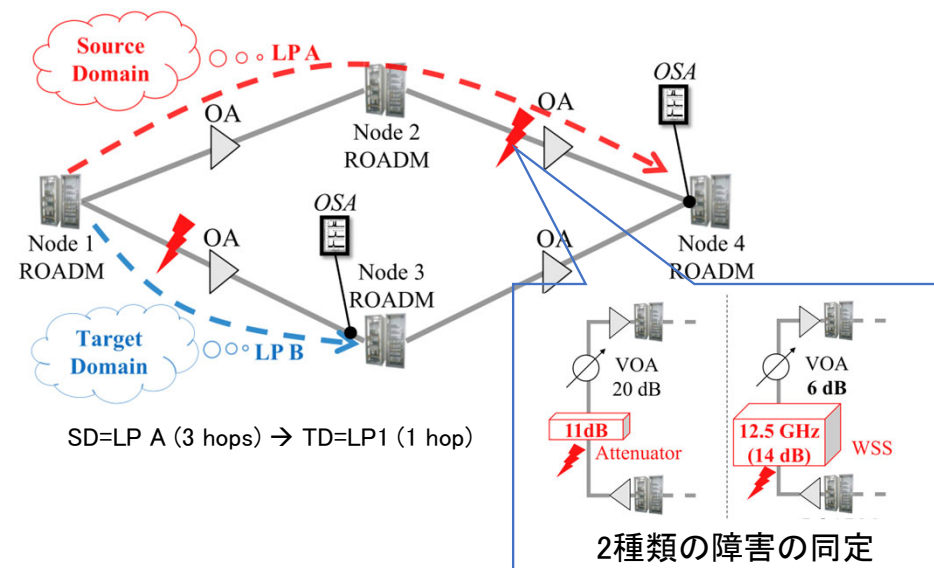


学習の流れ:

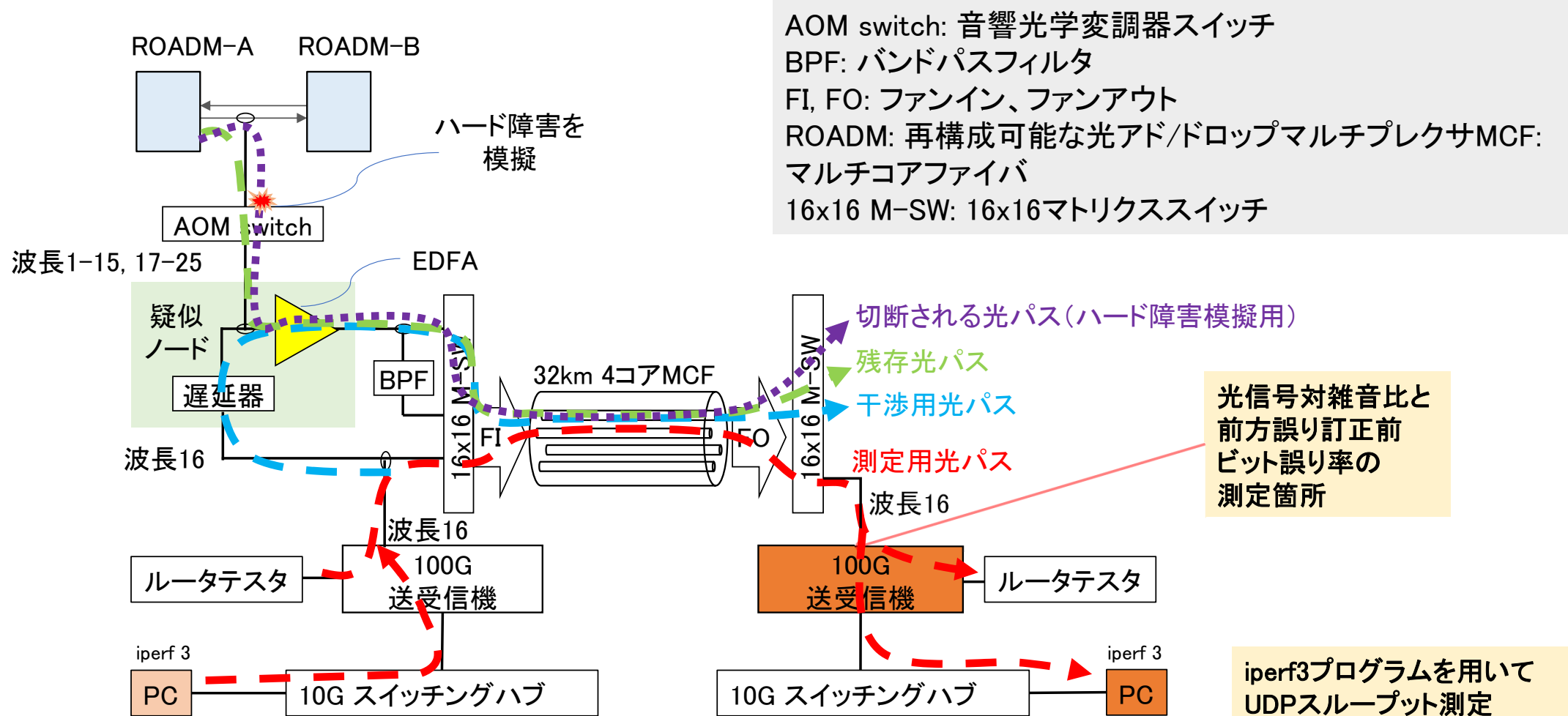
- Source Domain (SD) データで学習
- Target Domain (TD) データで1.のモデルを再度チューニング

評価:

SDデータのみで学習、及びTDデータのみで学習したケースと比較



次世代光ファイバのコア間干渉を用いた模擬障害実験

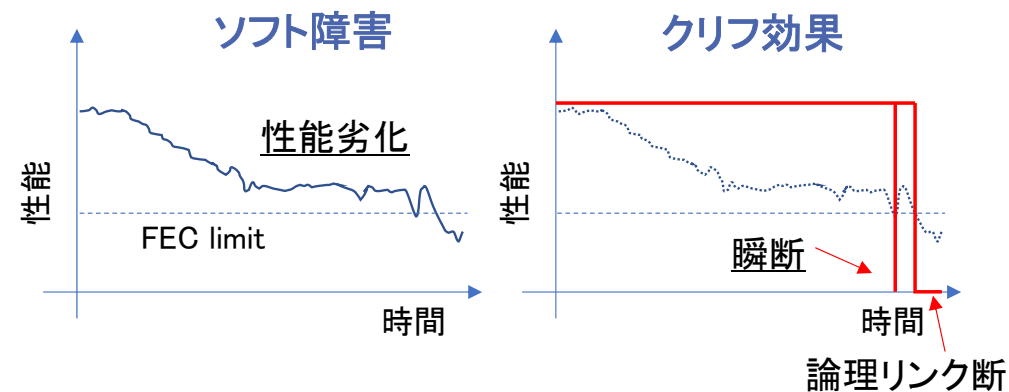


NICT 注目した課題：経時変化での障害

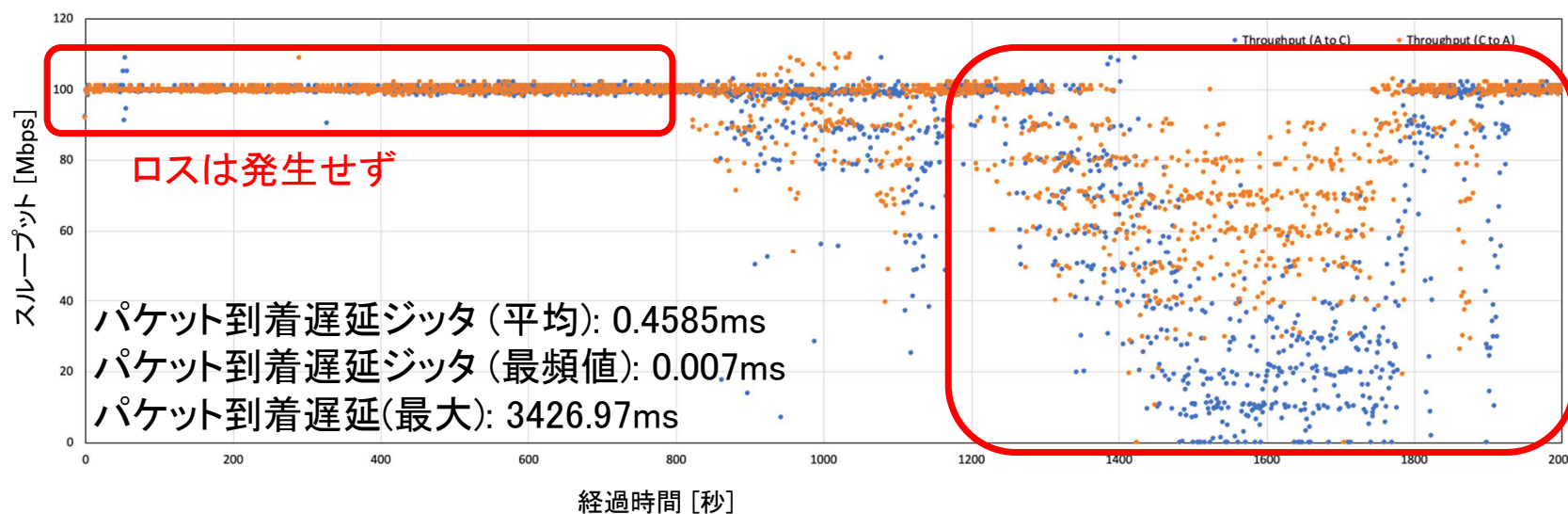
- 課題：障害発生後の対応では後手のため、事前対応する技術が必要

ソフト障害

- フィルタ狭窄化や振動、ファイバ捻れなどによる伝送品質(QoT)の劣化
- FECによるエラー訂正により、性能劣化は表面化しづらい
- エラー訂正の限界を超えると、急激に性能が悪化(クリフ効果)



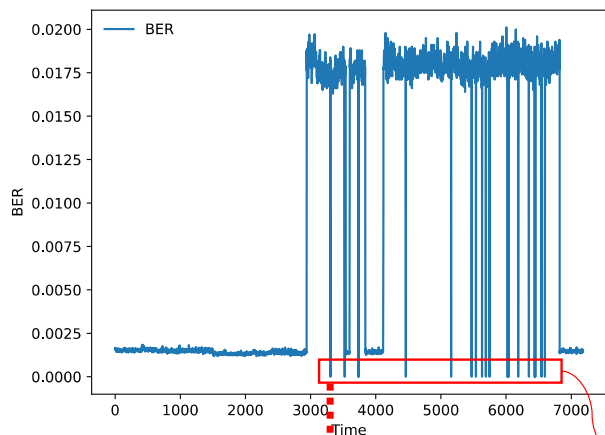
- ソフト障害の段階で、経時変化によるスループット低下などの影響を予測することができないか？



スループットの大幅な低下を観測

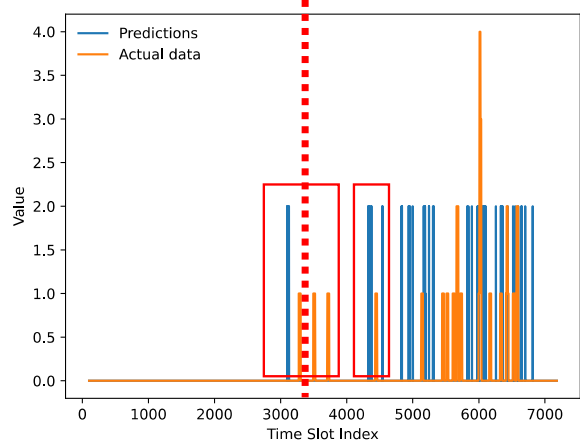
ランダムフォレストによる障害予測の評価（リンクダウンあり）

時刻2900でネットワークの大きな状態変化発生



データ数: 7,182

Dataset 3



Pre-FEC BER=0
はリンクダウンを表す

障害発生の前に障害
の可能性を予測

Dataset 3における予測値と実際の値

- 一時的なリンクダウンが発生する前に,
リンク障害が発生する可能性があることを予測
 - 光ネットワークの測定箇所とは離れたところにおいて発生した光パス数の環境変化により,
Pre-FEC BERが大幅に上昇したデータが
機械学習モデルに入力されたため
- 実際にリンク障害が発生したあとは,
Pre-FEC BERが比較的高くなるタイミングで
リンク障害発生の可能性が高いと学習器モデルが出力

MLによりスループットの大幅な低下の予測可能性を検証、
リンクダウン前の事前対応が可能となる

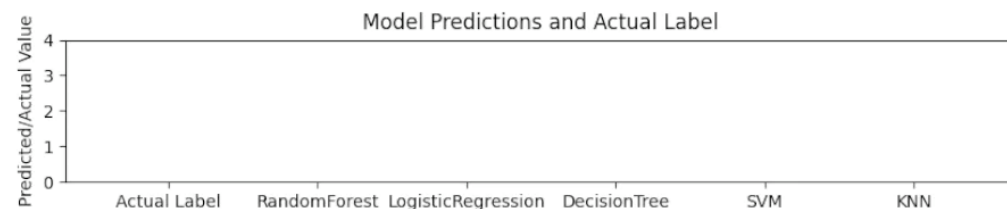
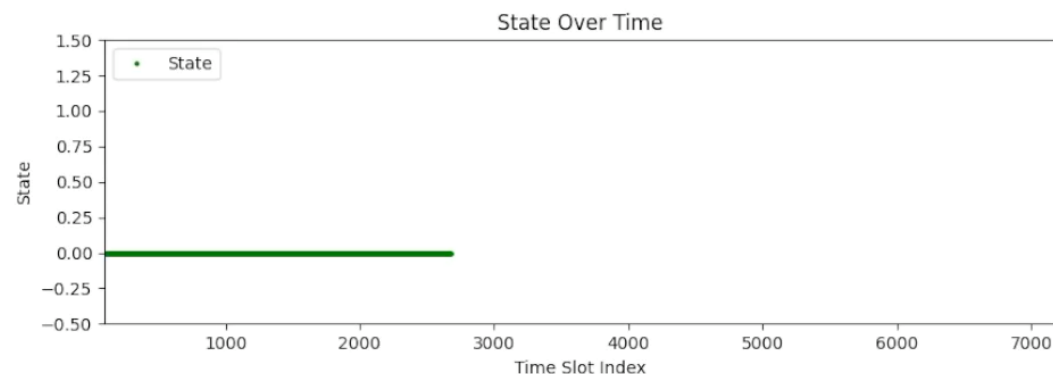
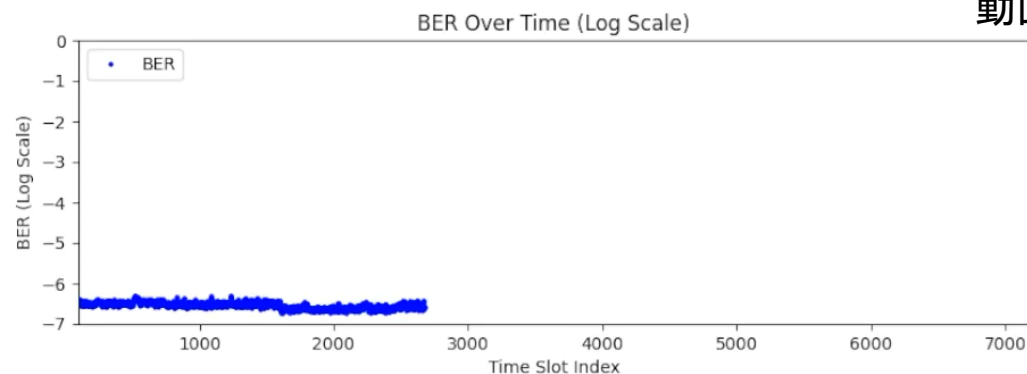
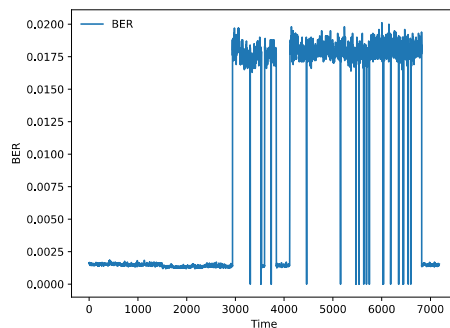
NICT 光リンク障害予測アルゴリズムの実装・評価

・クロストークノイズの経時変化による
リンク障害(瞬断・不通)を直前に予測

・複数の機械学習モデルを実装・評価

Model	Data1	Data2	Data3	Overall
Random Forest	0.8433	0.9284	1.0000	0.9624
Logistic Regression	0.8433	0.9199	1.0000	0.9533
Decision Tree	0.0321	0.6285	0.6374	0.9344
SVM	0.8433	0.9286	1.0000	0.9549
KNN	0.3694	0.6696	0.6952	0.9435

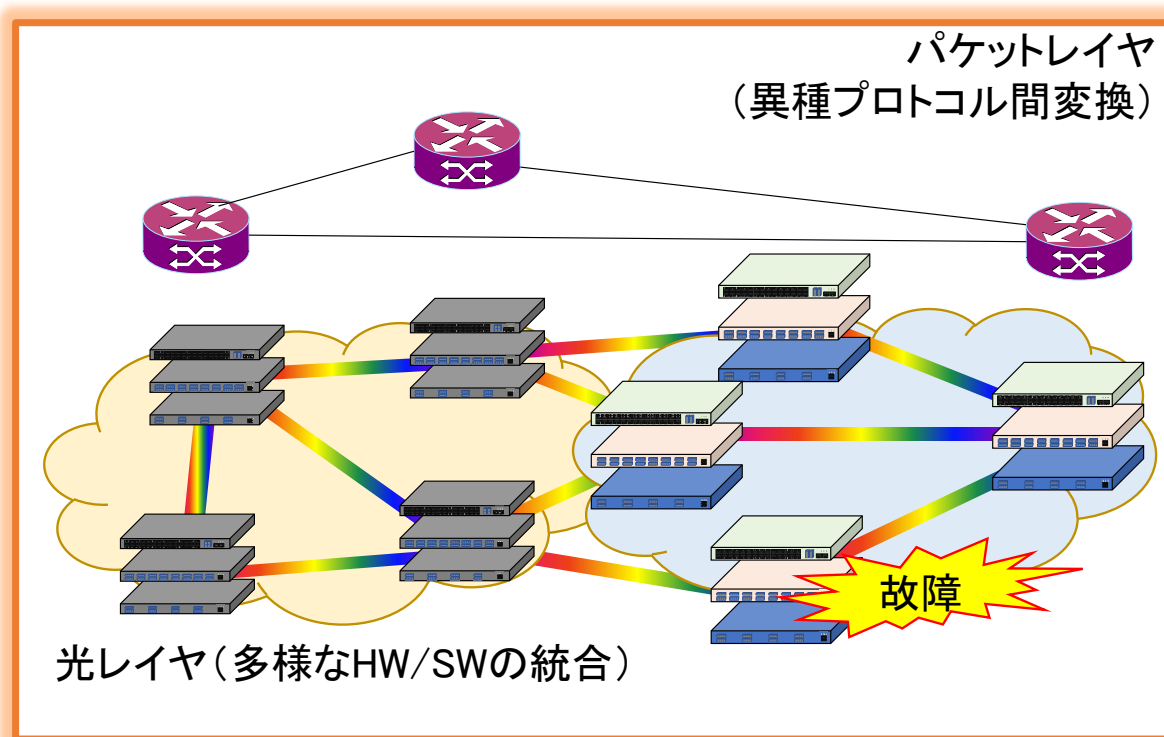
エラー訂正前の
ビットエラー率
(研究室内環境で
データセットを構築)



エラー訂正前のビットエラー率の時間遷移(上段)
エラー発生状態(中段)及び障害予測アラート(下段)

動画

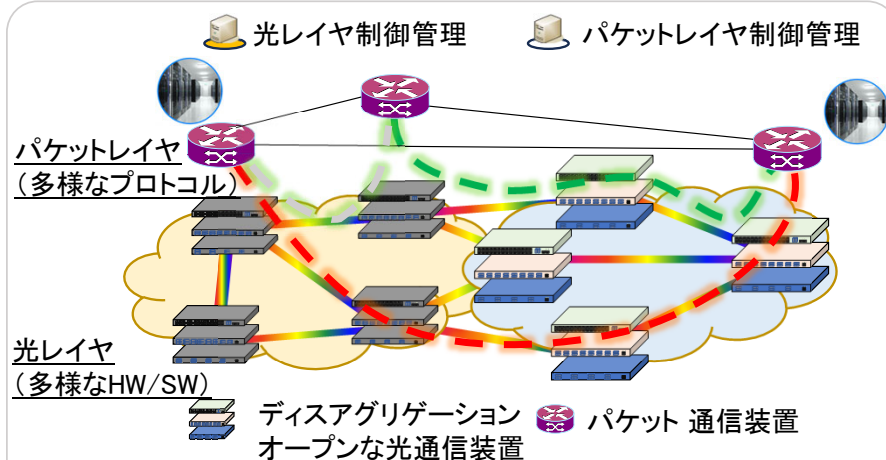
ネットワーク資源のオープン化による相互接続基盤技術



NICT ネットワーク資源のオープン化による通信連携復旧

中長期計画: 平常時/災害・大規模障害時における通信基盤を連携し、クラウドエコシステムにおける構成調整の弾力化と障害復旧の迅速化を目指して、異種トランスポート網の高度な相互接続・統合利用を促進するための、ネットワーク資源のオープン化、需給均衡、通信基盤連携等の基盤技術を確立する。

事業者内通信基盤障害復旧



多様かつオープンな光トランスポートネットワークとクラウド間の相互接続による早急復旧

目的:

- ・クラウドエコシステム構成調整の弾力化
- ・障害復旧の迅速化

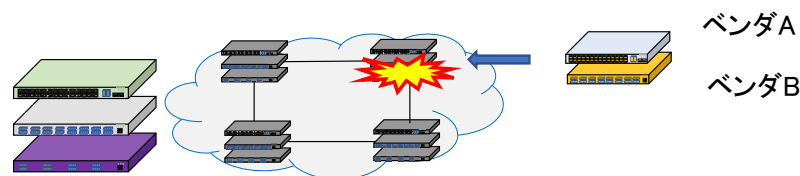
実施内容:

- ・マルチベンダ装置・光ネットワーク多様性対応技術
- ・マルチレイヤ、マルチキャリアネットワーク間相互接続技術

成果:

- ・ヘテロな光通信環境に統一的に対応できるアプローチを創出
- ・既存キャリア間相互接続モデルに基づきキャリア間連携復旧実証

失われた通信機能を素早く再建



オープン化+ディスアグリゲーション光ネットワーク復旧
(異種ベンダ間相互接続)

発表:

OFC2021、ECOC2021、OFC2023(招待講演)、PIERS2025、JOCN

展示:

iPOP2025 Showcase

NICT オープン化による多様な光ネットワーク間での資源の統合と早急復旧(実証実験)

課題

- オープン化した斬新な光ネットワークとレガシー光ネットワークを含めて光ネットワークの多様性対応、資源統合
- 大規模障害時に、異種ベンダ装置の相互接続による早急復旧

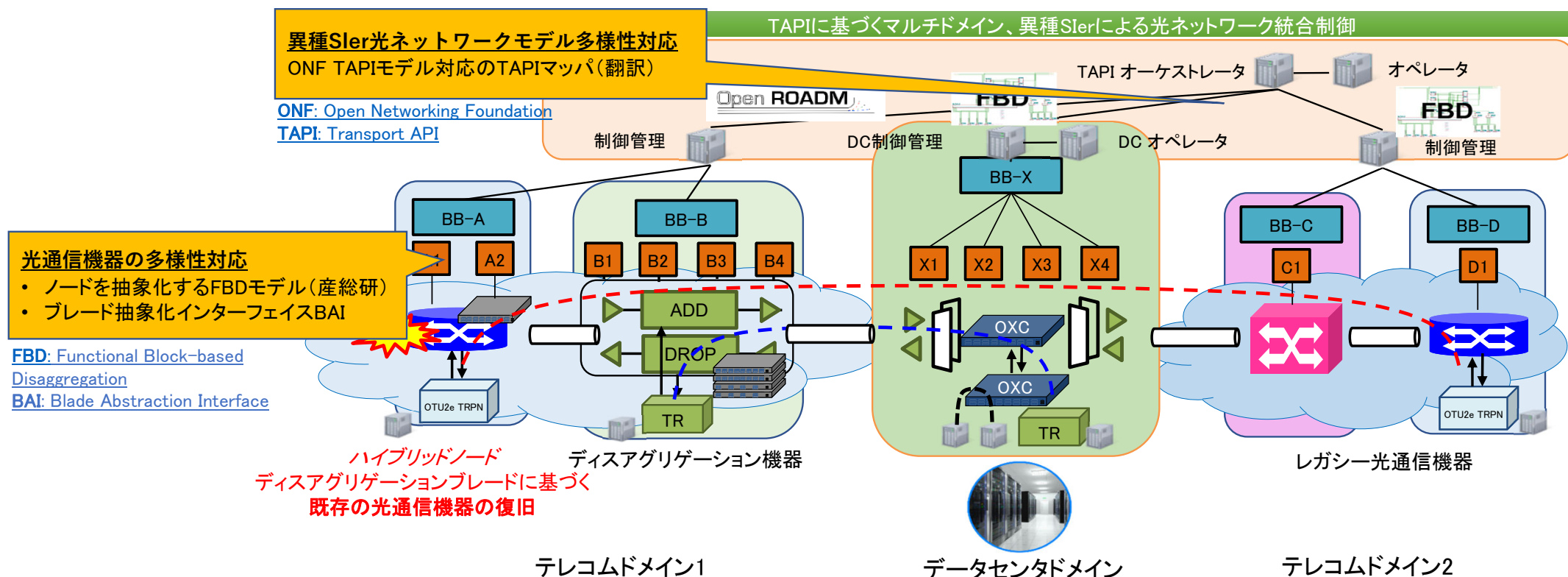


成果

- ヘテロな光通信環境に統一に対応できるアプローチを創出
 - 平常時: 異種ベンダ光通信資源統合運用範囲の拡大
 - 大規模障害時: 異種ベンダ光通信資源の利活用、早急復旧

光ネットワーク早急復旧

産総研、KDDI総合研究所共同研究



出典: S. Xu et al., OFC2021、ECOC2021、OFC2023 (招待講演)、JOCN(招待論文)

NICT 光・パケット、異種事業者間相互接続・連携による大規模災害時早急復旧(実証実験)

課題

- キャリア間連携復旧のビジネスモデル
- キャリア間連携による大規模光・パケット(MPLS)トランスポートネットワークサービスの早急復旧

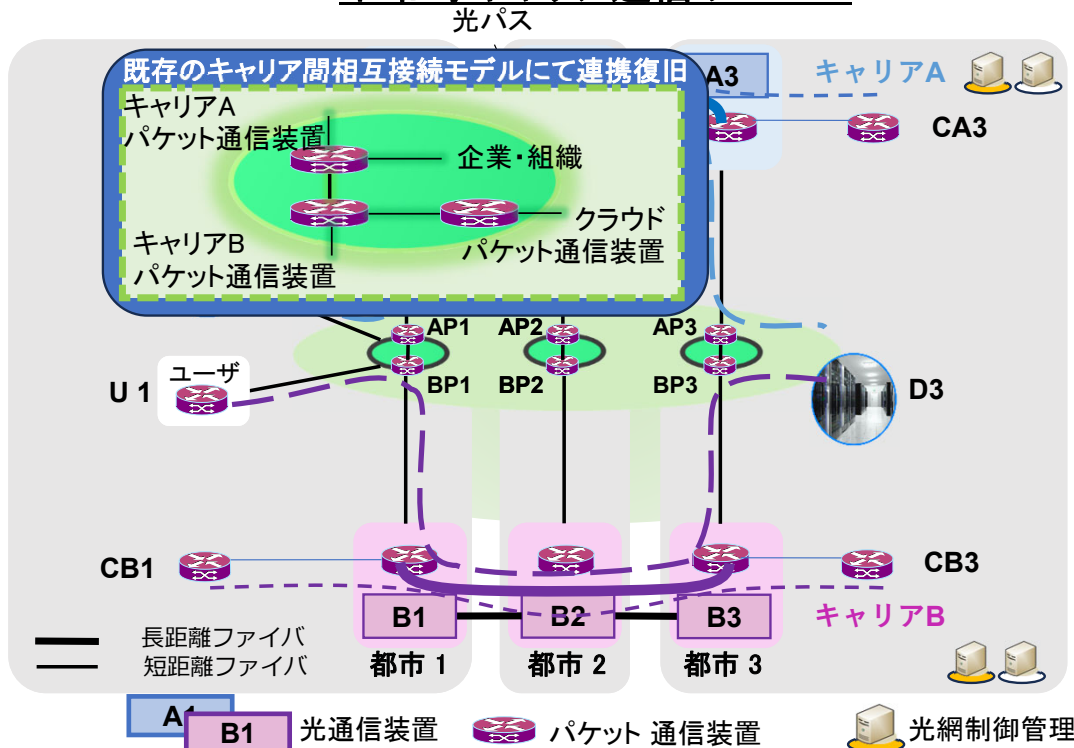
大規模マルチレイヤネットワークの早急復旧

成果

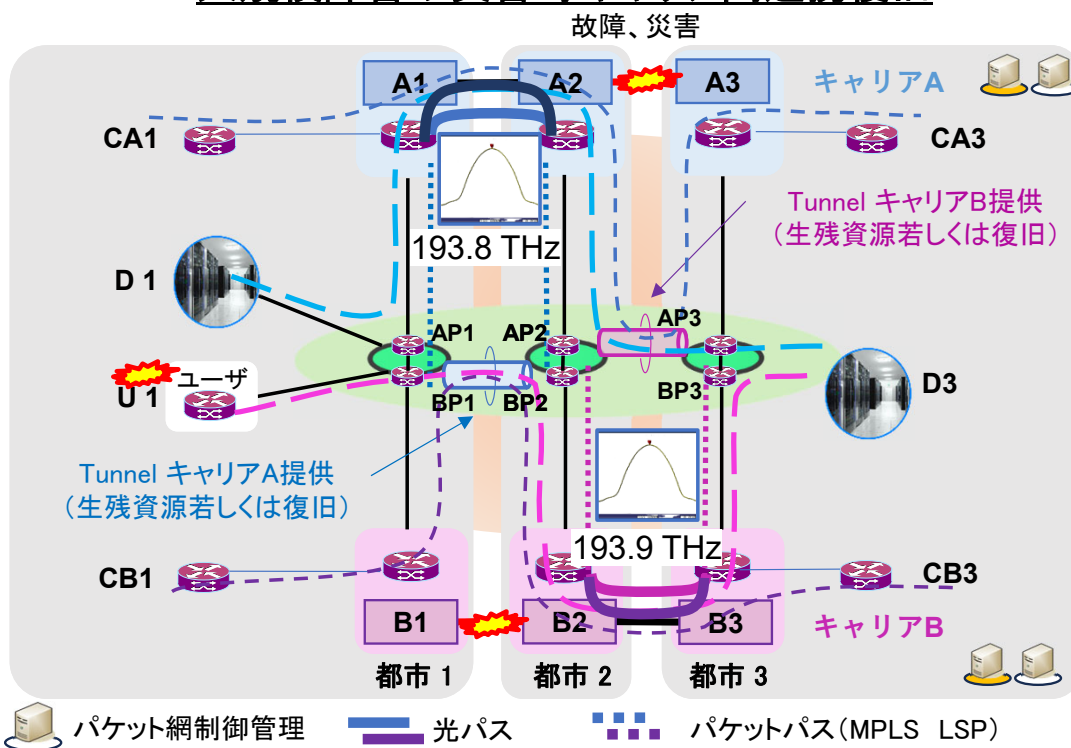
- 既存キャリア間相互接続モデルに基づきキャリア間連携復旧実証
- 平常時: キャリア間相互接続による通信サービス範囲の拡大
- 大規模障害時: キャリア間生残通信資源融通による早急復旧

NTTドコモビジネス、KDDI総合研究所と共同

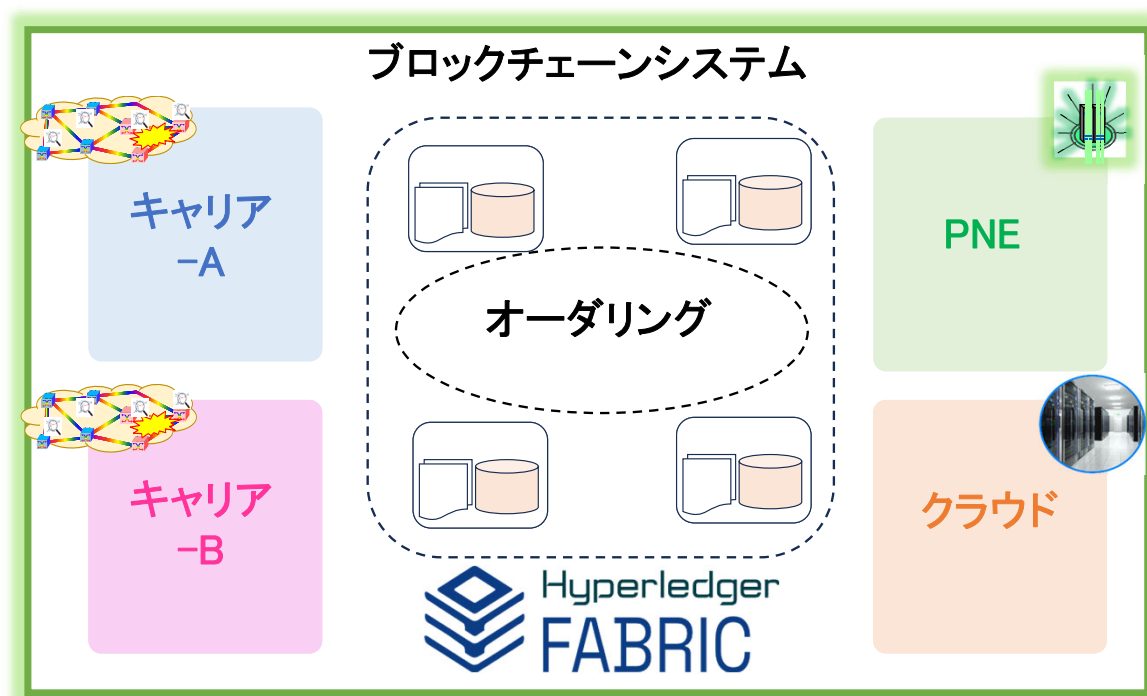
平常時キャリア通信サービス



大規模障害や災害時キャリア間連携復旧



情報共有・需給マッチング：通信と計算基盤連携復旧

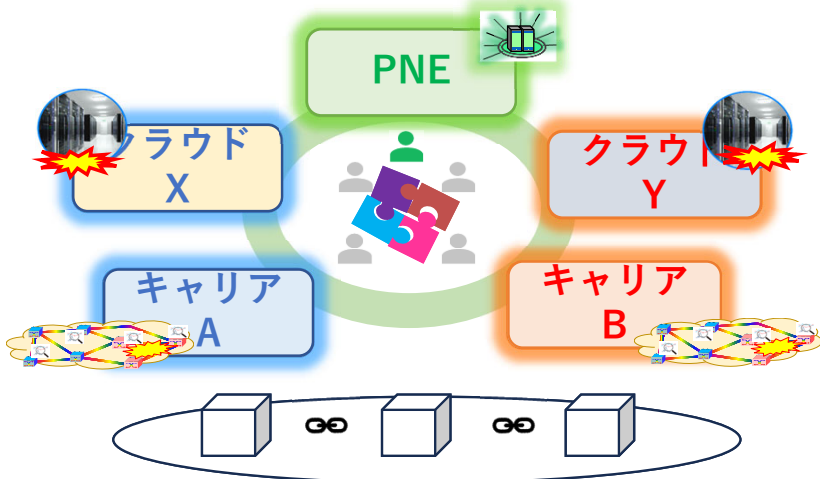


情報共有・需給マッチング：通信と計算基盤連携復旧の研究

中長期計画：平常時/災害・大規模障害時における通信・計算基盤を連携し、クラウドエコシステムにおける構成調整の弾力化と障害復旧の迅速化を目指して、異種トランスポート網の高度な相互接続・統合利用を促進するための、ネットワーク資源のオープン化、需給均衡、通信・計算資源の連携等の基盤技術を確立する。

プラットフォーム研究

プロバイダ中立エクスチェンジ(PNE)



ブロックチェーンに基づく異種事業者間
連携促進プラットフォーム

目的：

・クラウドエコシステム構成調整の弾力化と障害復旧の迅速化を可能にする基盤技術を確立

実施内容：

- ・事業者間秘密情報漏洩のない連携
- ・「公開」・「公平」・「公正」な情報共有
- ・ステークホルダ間の連携により復旧戦略策定を支援

成果：

- ・抽象化による秘密情報漏洩のない事業者間連携復旧戦略策定を実証
- ・既存キャリア間相互接続モデルに基づくキャリア間連携復旧戦略策定を実証（通信キャリアと連携、PoC実施）

発表：

ONDM2024、FNWF2024（招待講演）、PIERS2025、JOCN（招待論文）

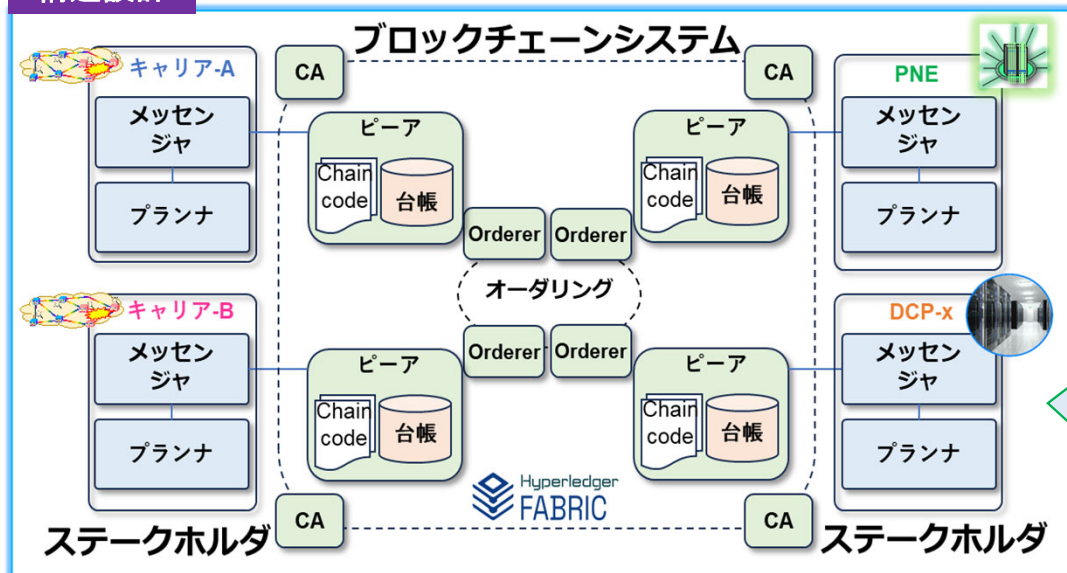
展示：

iPOP2025 Showcase

NICT ブロックチェーンを用いた異種事業者間連携促進プラットフォーム

- 通信事業者間連携を促進し、「公開」・「公平」・「公正」な情報共有を可能にするブロックチェーンを用いた異種事業者間連携促進プラットフォームを設計開発、実証実験(PoC)を実施
- 「通信事業者間連携復旧」、「通信・計算基盤間連携復旧」等多様な連携態様を柔軟に対応・支援
- 今後多数のステークホルダ間の大規模連携に向けて、連携の複雑度を低減するために、PNEが主導するステークホルダ間のシンプルな協調手法を創出

構造設計

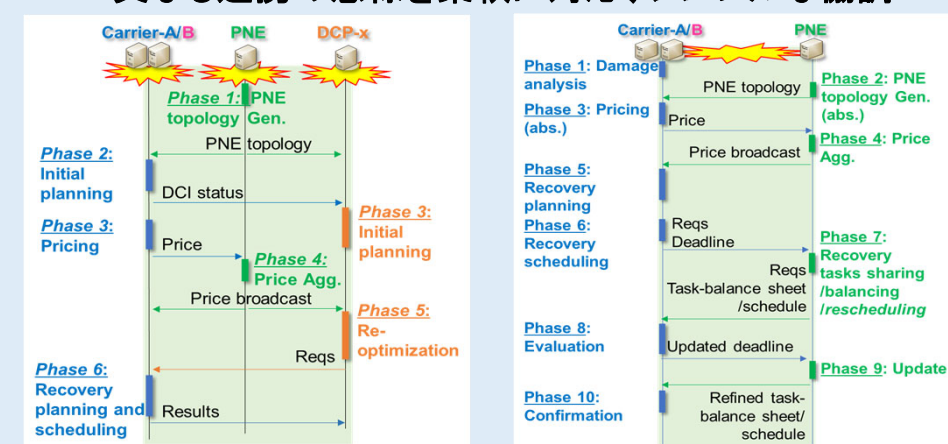


ブロックチェーンに基づく異種事業者間連携プラットフォームの構造

CA: Certificate Authority

実証実験

異なる連携の態様を柔軟に対応、シンプルな協調



通信・計算基盤事業者間連携

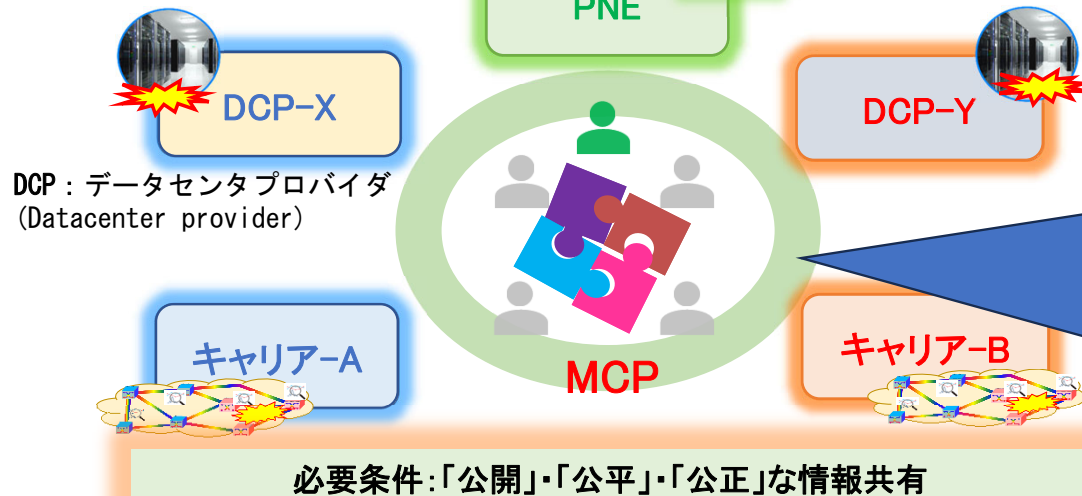
通信事業者間連携

ブロックチェーンに基づく異種事業者間連携復旧戦略策定の実証実験

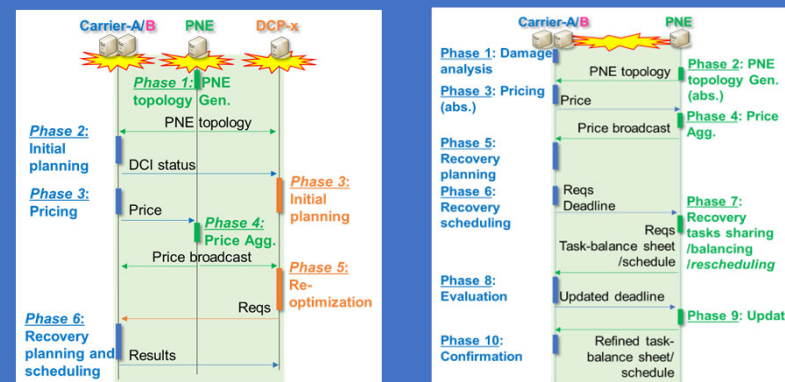
NICT 異種事業者間「連携促進基盤」(MCP)

Multi-Entity Cooperation Platform (MCP)

プロバイダ中立エクステンジ(PNE)



異なる連携の態様を支援



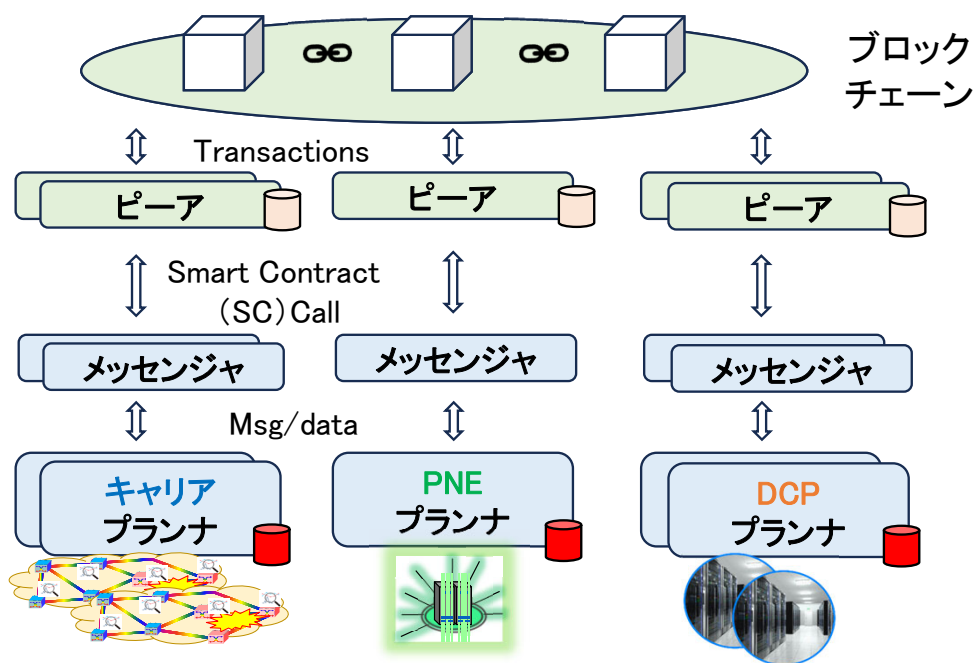
ブロックチェーン技術の魅力的な特徴

- コンソーシアムブロックチェーンでステークホルダを限定
- 自律分散(プライベートブロックチェーンでも)
- 改竄防止
- プライバシー保護
- 高信頼なデータ共有
- Etc.

主流のブロックチェーン開発団体 幅広い応用を支援

NICT 連携促進プラットフォームの構造

連携促進プラットフォーム



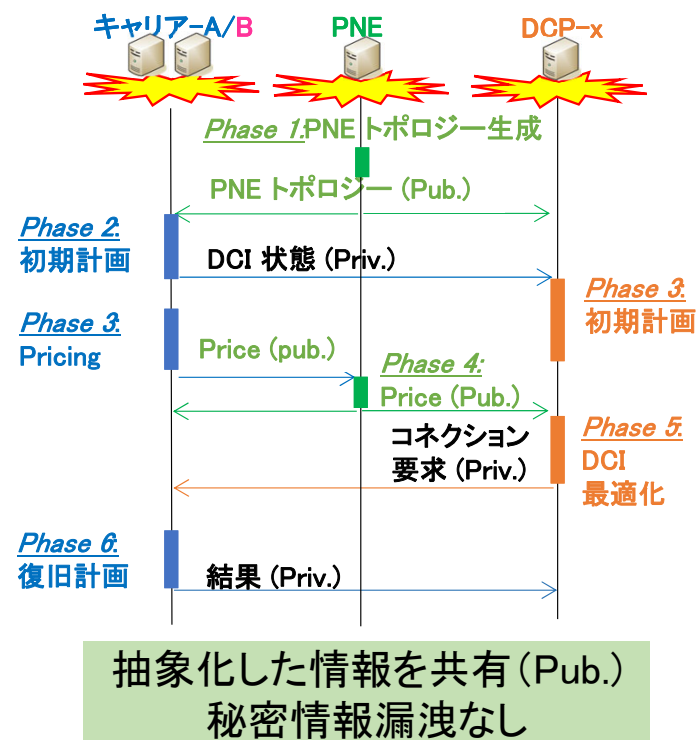
連携促進プラットフォームに三つの技術と特徴

多様な連携方式を柔軟に支援

マルチ/バイラテラル情報共有

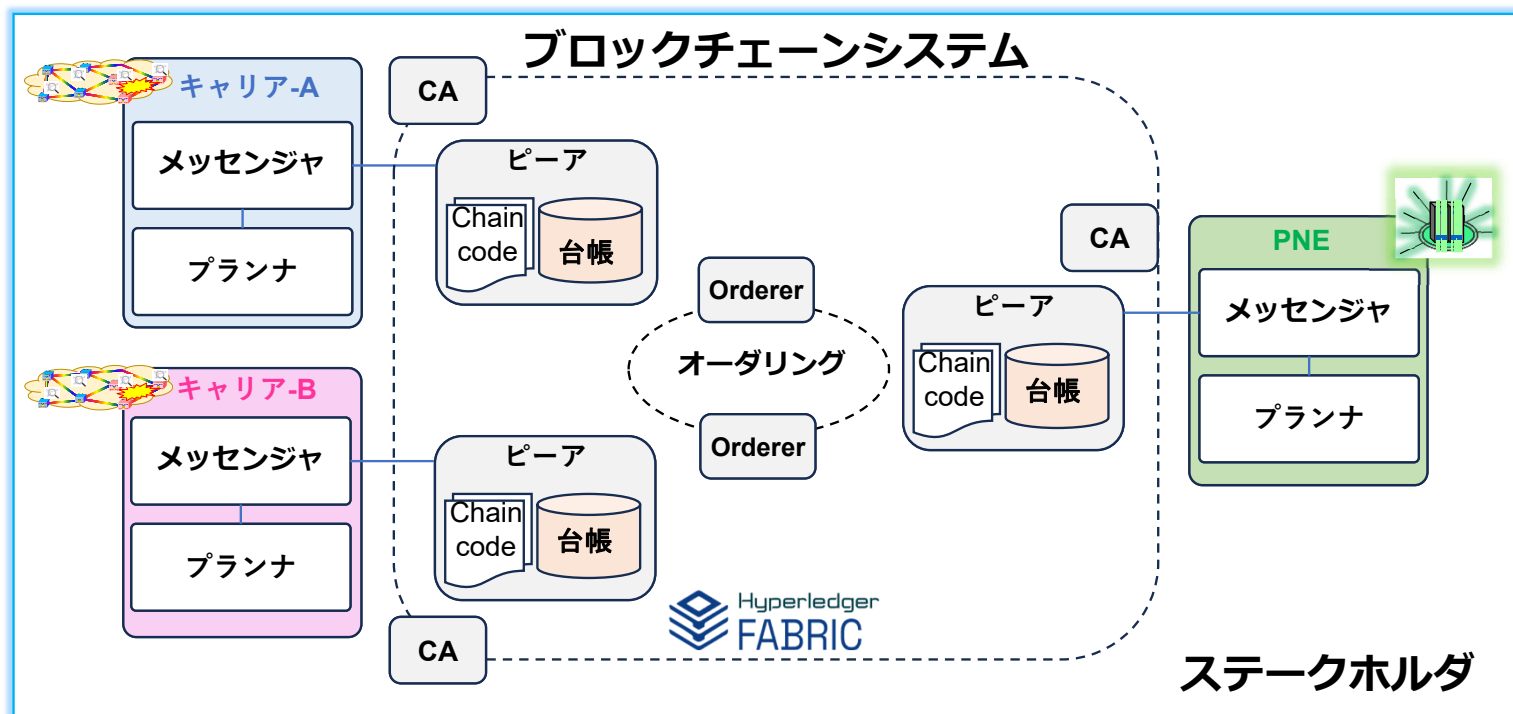
PNE主導でのステークホルダ間のシンプルな協調

連携復旧戦略の策定のプロセス



NICT 連携促進プラットフォーム実証実験

実証実験: キャリア間連携復旧戦略の策定

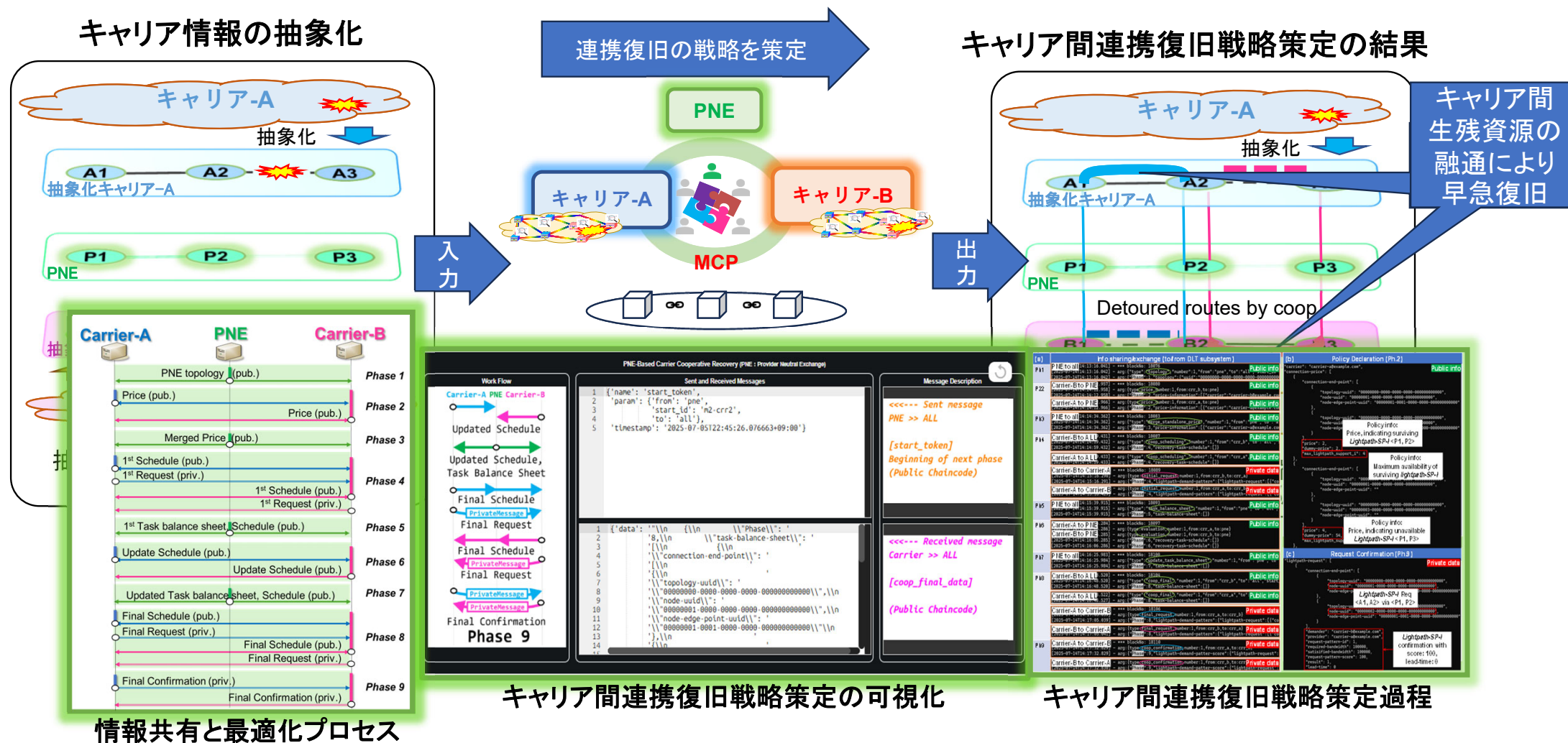


連携促進プラットフォームのプロトタイプ(MCP)

ステークホルダ: キャリア-A/B、PNE

Block Chain: HyperLedger Fabric (OSS)

MCP上でのキャリア間連携復旧戦略の策定(実証実験)



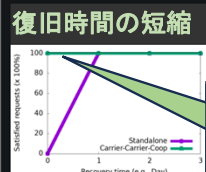
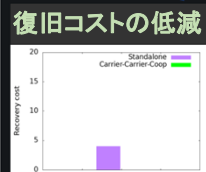
キャリア間連携復旧戦略立案の詳細(キャリア-A例)

キャリア間連携復旧戦略概要と評価

キャリア間連携復旧戦略(相互支援)のスケジュール

列A/B:
連携なしの復旧戦略

列C/D:
連携ありの復旧戦略



連携ありの場合通信復旧
Leadtime = 0 (早急復旧)

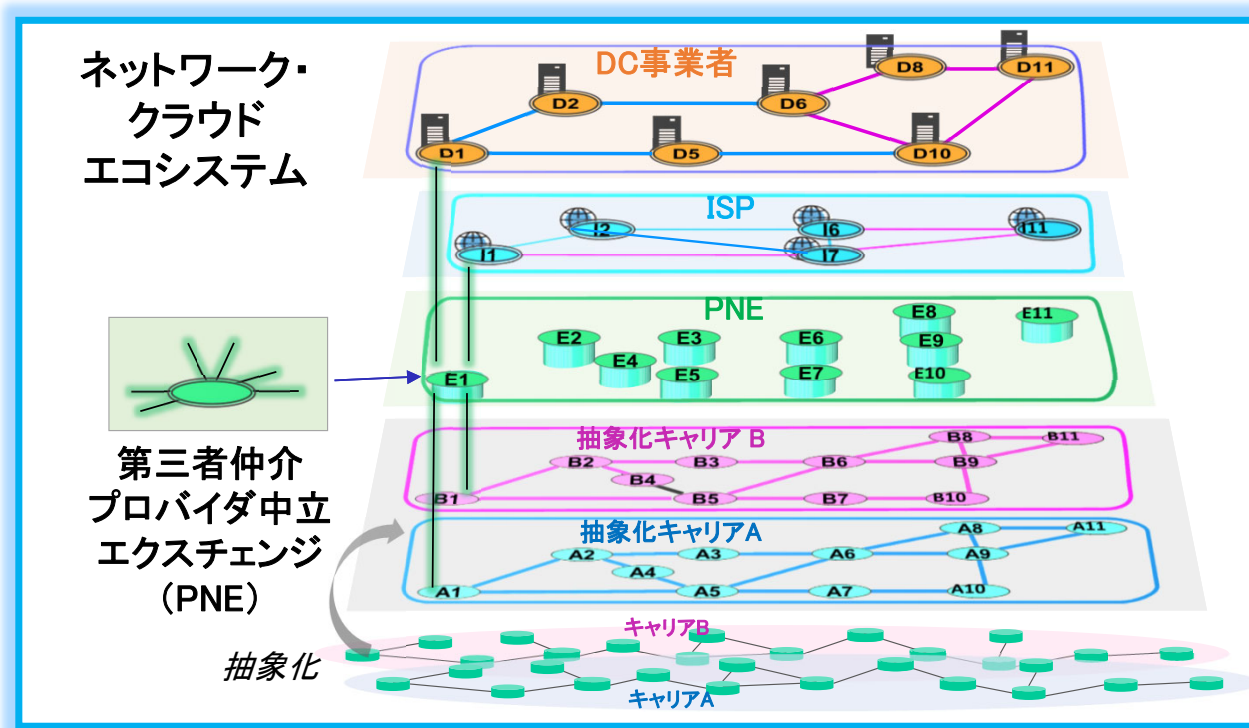
キャリアBに支援を提供
(生残資源)

キャリアBから支援を受ける
(生残資源)

連携なしの場合通信復旧
Leadtime = 1

PNE-Based Carrier Cooperative Recovery

A	B	C	D
Carrier will Ask lightpath_support_j of counterpart	Carrier will Offer lightpath_support_i to counterpart		Leadtime0
		Carrier will Ask lightpath_support_j at leadtime 1 of counterpart	Leadtime1
		Carrier will Offer lightpath_support_i at leadtime 2 to counterpart	Leadtime2



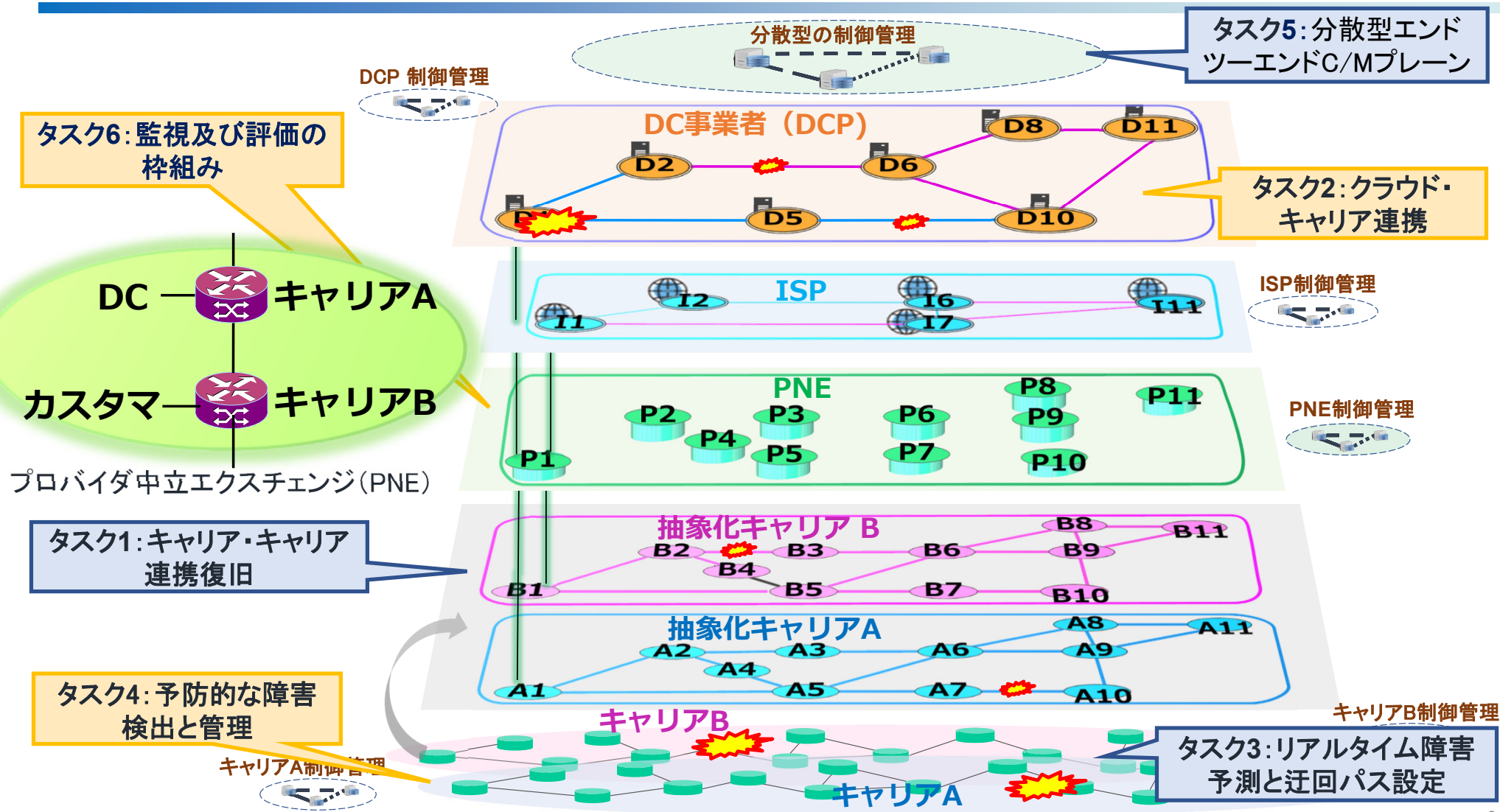
NICT 高信頼光ネットワーク実現に向けたクラウド・キャリア連携戦略

- 課題名:
Cloud-Carrier Cooperation for Efficient and Ultra-Reliable Programmable Backbone Networks
- AI、デジタルツイン、アプリケーション志向ネットワークといった新たなパラダイムを踏まえ、高信頼性要件を満たすアーキテクチャが必要
- 複数の事業者間でクラウドと通信事業者が連携する革新的なネットワークにおいて、高度なネットワークプログラマビリティを活用し、統合されたネットワークとクラウドのエコシステムにおいて、ニーズに基づいた柔軟なリソース共有と信頼性の高いエンドツーエンドの通信実現を目指す
- サードパーティ事業者
- データ抽象化
- 連携
- ...

UCDAVIS



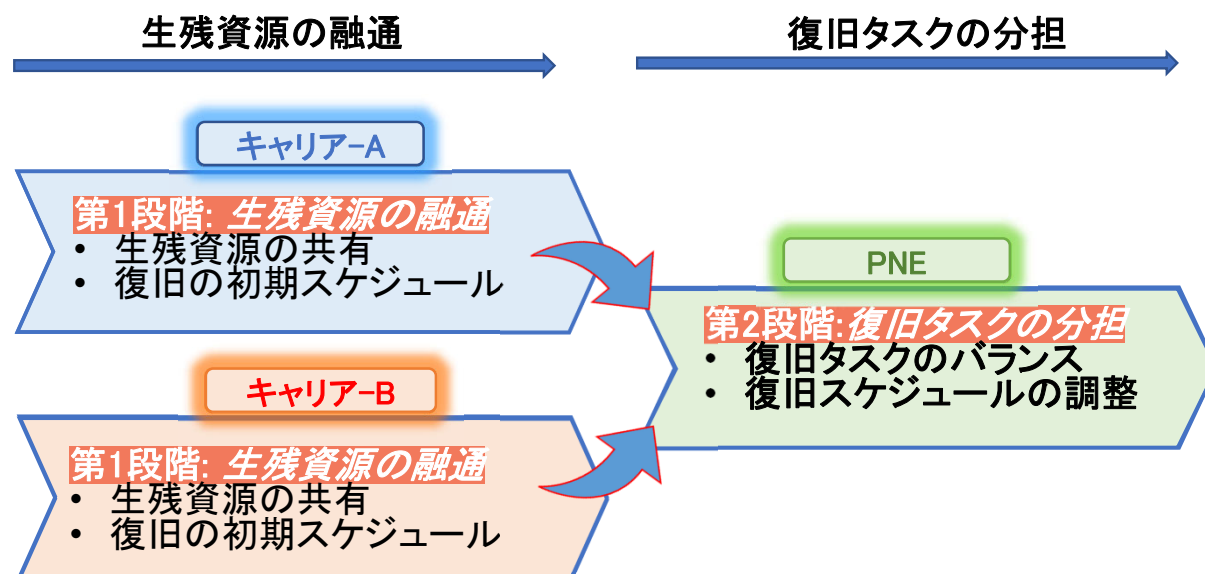
NICT プロジェクト全体構成と6つのタスク



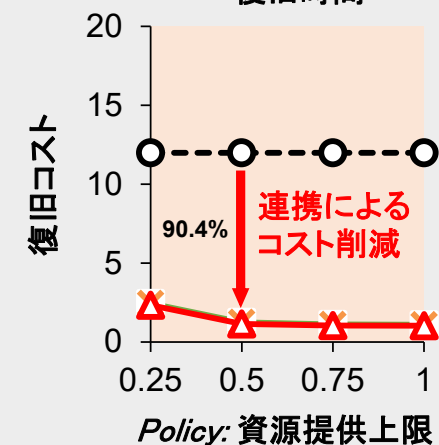
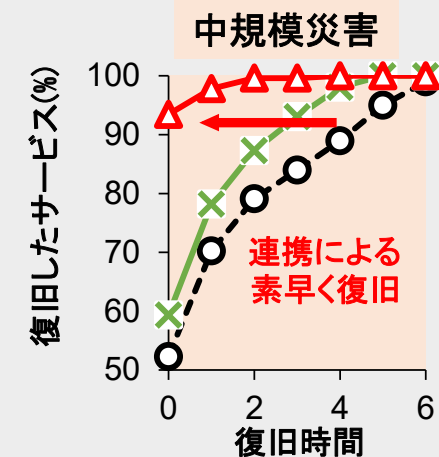
抽象化に基づき情報共有・連携

NICT タスク 1: キャリア・キャリア連携復旧

- 従来のアプローチ: 各キャリアはリソースを共有せずにネットワークを単独復旧
- 提案ソリューション(2段階の連携)
 - 第1段階:
 - 生残資源の融通と通信事業者による予備的な復旧スケジュールに基づく協力的な復旧計画
 - 第2段階:
 - 復旧タスクの分担とスケジュールの進捗に基づく協力的な復旧計画



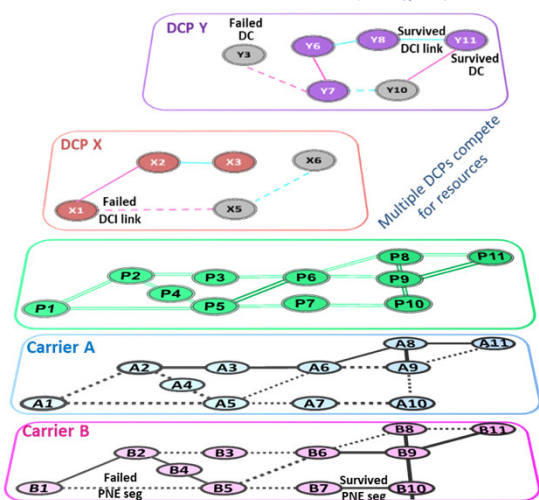
数値評価例



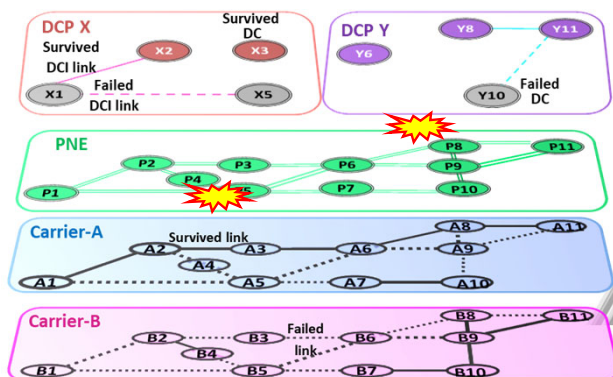
- 連携なし
- ×- コスト削減優先の連携
- △- 復旧時間短縮優先の連携

NICT タスク 2: クラウド・キャリア連携

2b: クラウド・キャリア連携(複数のクラウド)

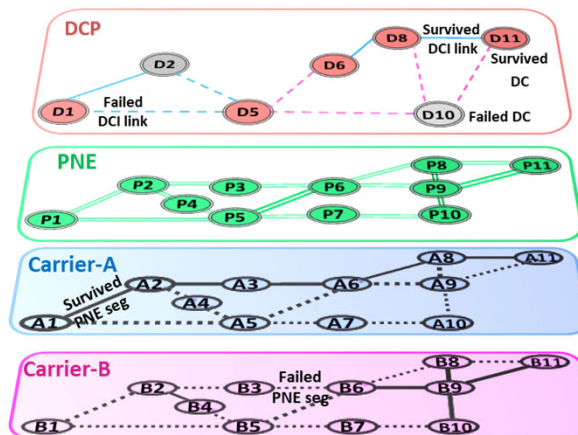


2d: PNE障害を対応するクラウド・キャリア連携

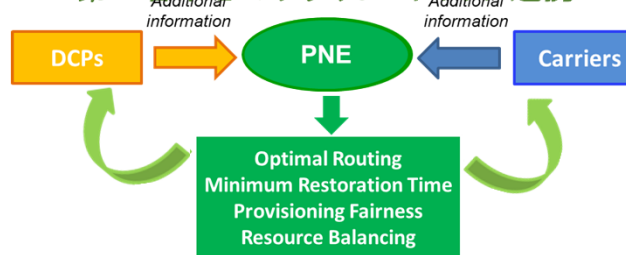


タスク1

2a: クラウド・キャリア連携(単一のクラウド)

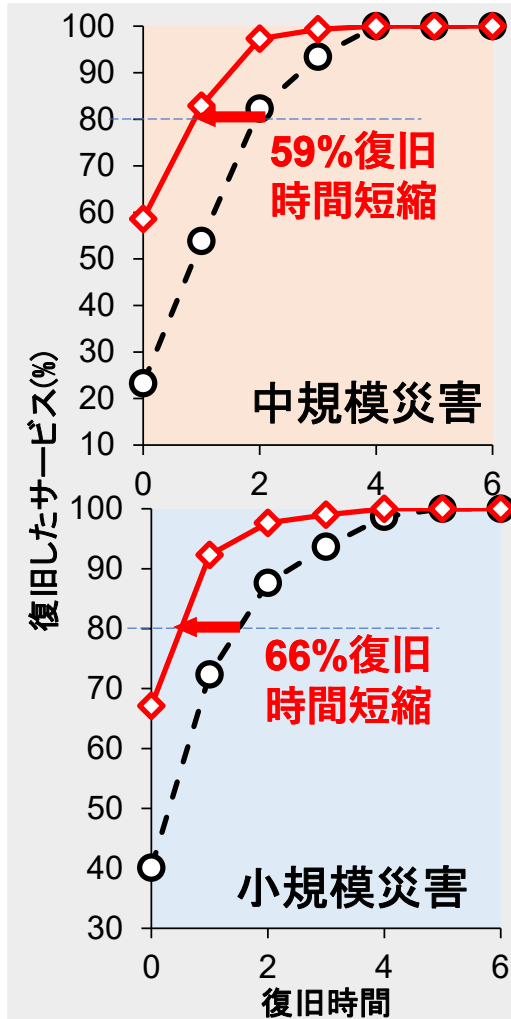


2c: 第三者中心のクラウド・キャリア連携



PNEを介したクラウド・キャリアの連携について、
復旧コストと復旧時間の点で優位であることを評価

数値評価例



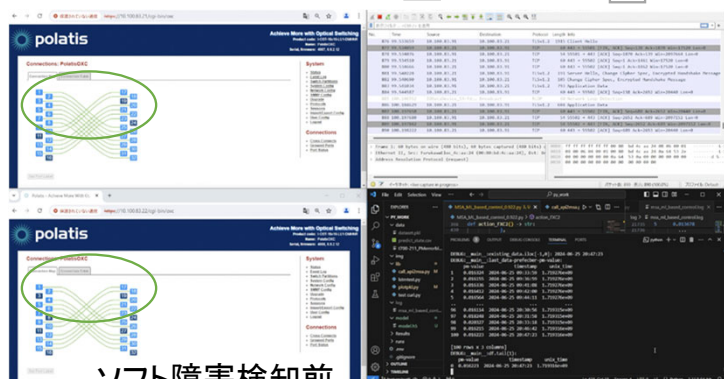
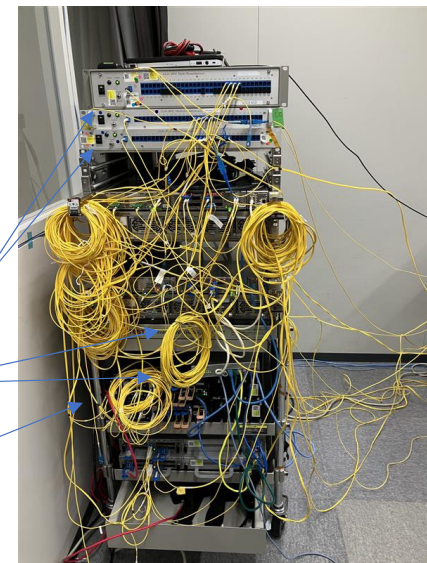
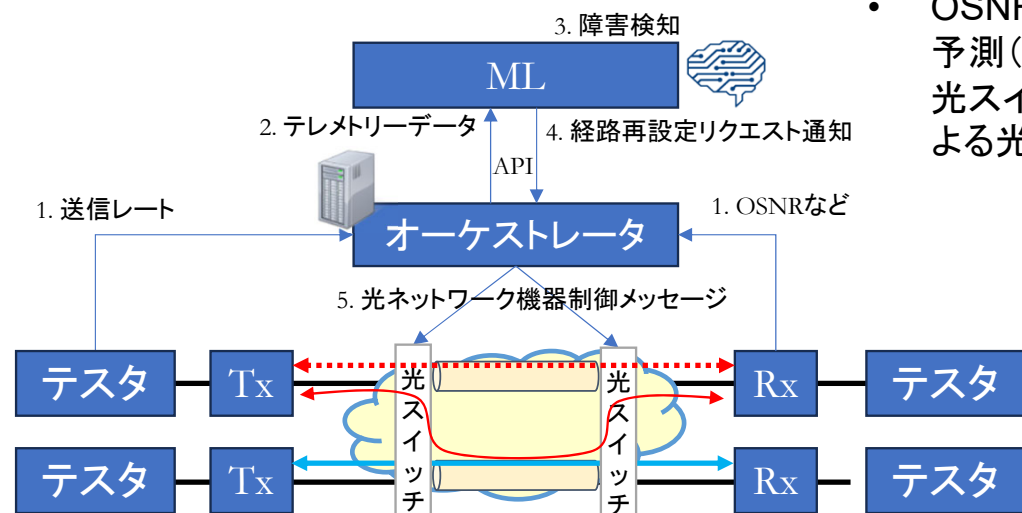
◇ クラウド・キャリア連携
○ キャリア単独復旧

タスク 3: リアルタイム障害予測と迂回パス設定

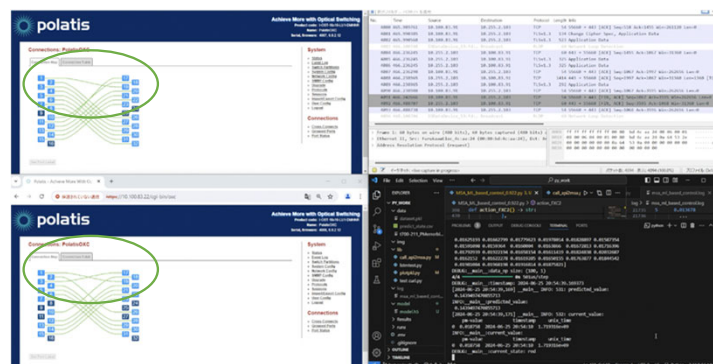
ネットワーク障害を予測し、オーケストレータによる迂回パス設定機能を実証

リアルタイム ML によるネットワークの復元力の強化

- OSNR及びFEC前ビットエラーレートに基づく障害予測(ソフト障害検知)と、光スイッチ(ファイバクロスコネク)自動再構成による光パス継続動作を実証



ソフト障害検知前



ソフト障害検知後、光スイッチの自動切り替えに成功

タスク 4: 予防的な障害検出と管理

3つの技術を組み合わせて、開発した障害検出技術の汎化性能向上を実証

マルチキャリア光ネットワークにおけるソフト障害箇所特定モデルを
一般化(汎化性能向上)するための
連合型プライバシー保護戦略(PPS: Privacy Preserving Strategy)

連合学習: Federated Learning

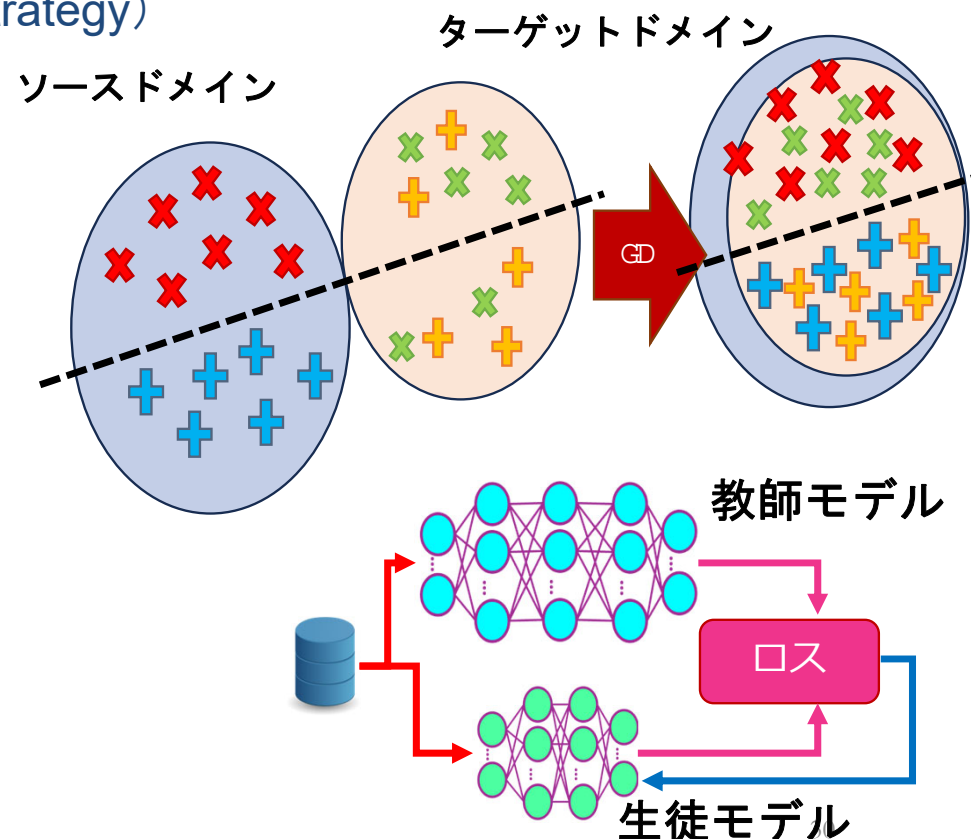
- データのプライバシー保護

ドメイン適応: Domain Adaptation (DA)

- あるドメイン(特定の範囲や環境条件など)で学習したモデルを、別のドメイン(未見の範囲や異なる条件)に転用

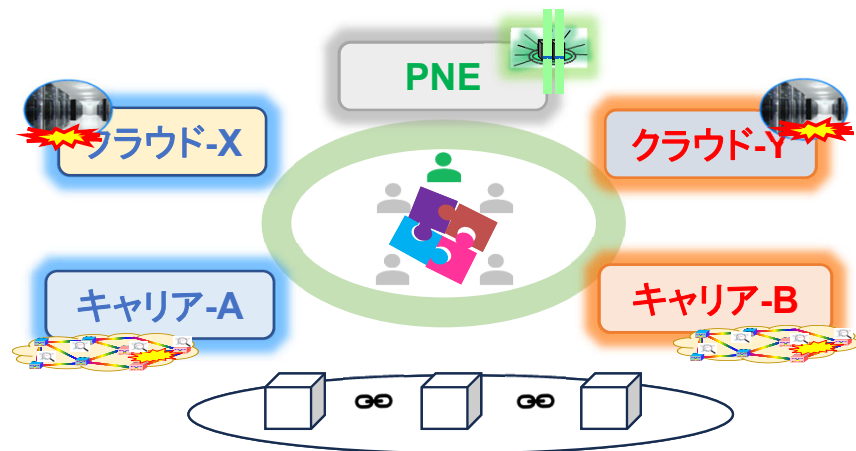
知識蒸留: Knowledge Distillation

- 機械学習モデルの汎用性向上



NICT タスク 5:分散型エンドツーエンドC/Mプレーン

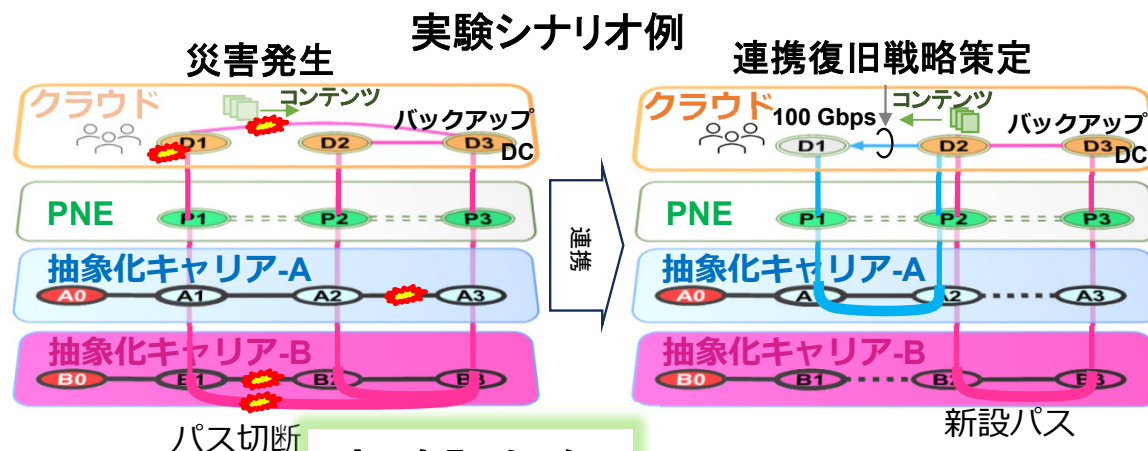
DCPとキャリアの協力的な復旧計画を検証



ブロックチェーンに基づく分散型制御管理プレーン

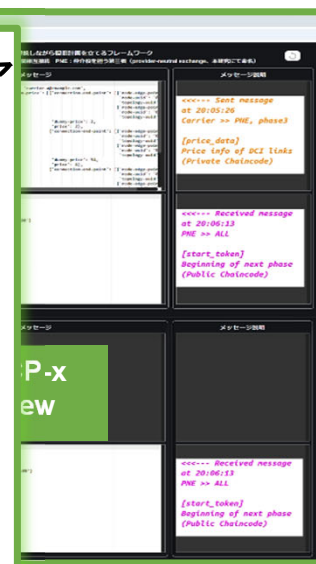
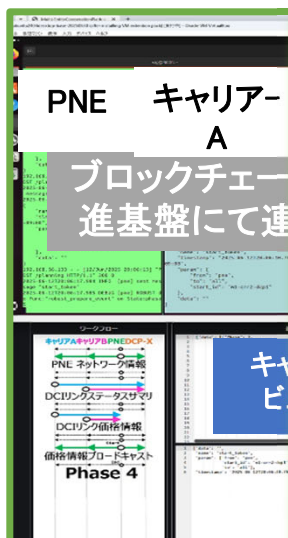
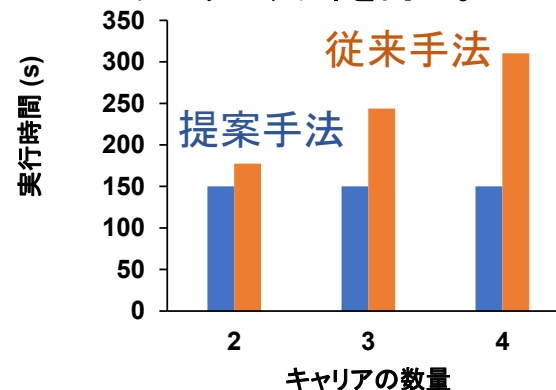
ブロックチェーン技術の魅力的な特徴

- コンソーシアムブロックチェーンでステークホルダーを限定
- 自律分散(プライベートブロックチェーンでも)
- 改竄防止
- プライバシー保護
- 高信頼なデータ共有
- Etc.



実験評価例

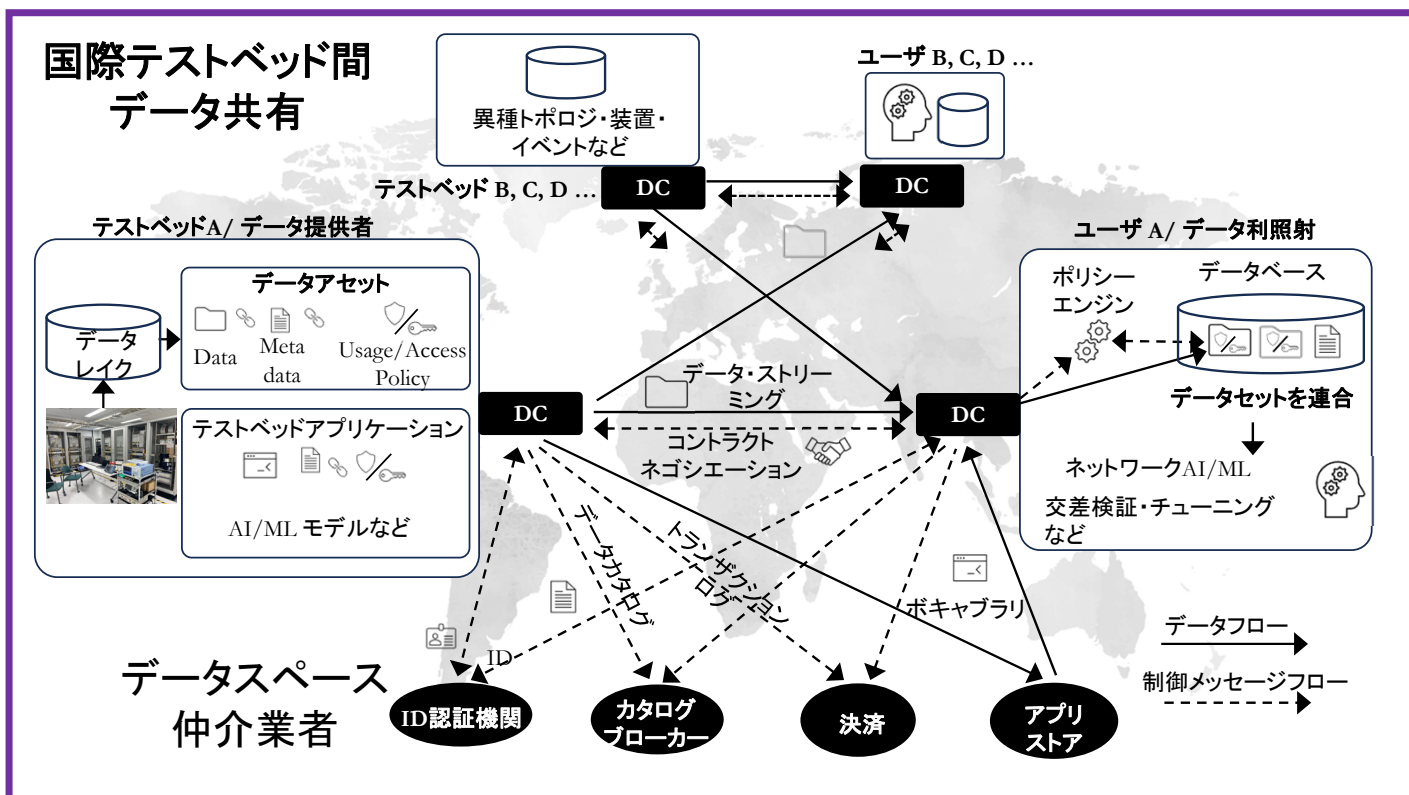
従来手法と比べ、実行時間はキャリアの数量増加によらず一定である。
スケーラビリティを向上。



出典: ONDM2024、FNWF2024(招待講演)、PIERS2025、JOCN(招待論文)

タスク 6: 監視及び評価の枠組み

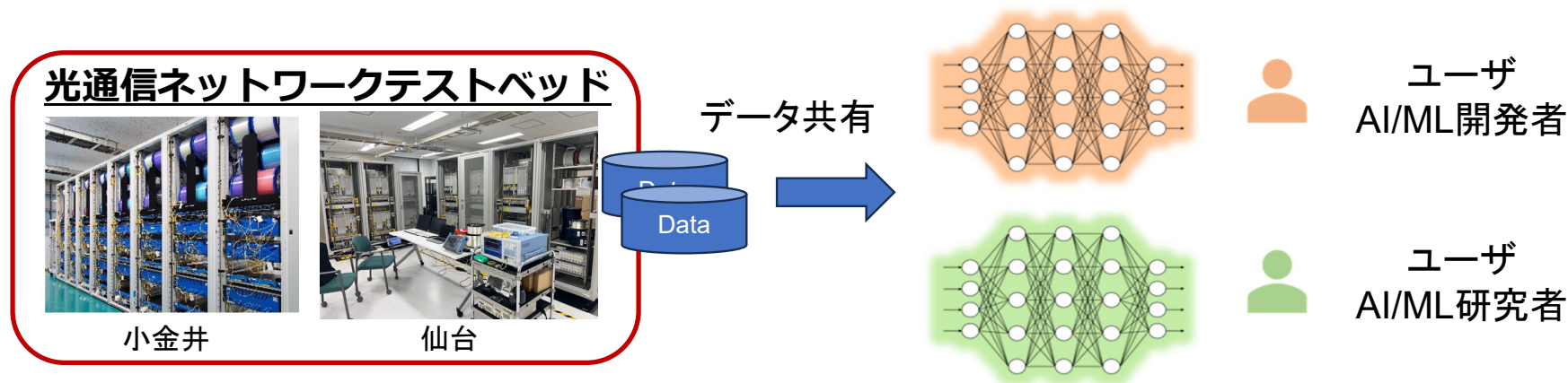
日独B5G連携 国際的な光ネットワークテストベッドデータ共有



NICT 蓄積された機械学習用データの利活用シーンの拡大に向けて

基盤となる光ネットワークの耐障害性を強化するAI/ML研究を促進（オープンコラボレーション）

- 障害予測、特定、位置特定、緩和といったAIベースのイノベーションは、学習と検証において異常/障害イベントのテレメトリデータに依存
- しかしながら、異常/障害イベントの希少性と機密性への懸念から、例えばキャリアネットワークからのデータセット（リファレンスデータ）の入手が限られていることが更なる研究開発の妨げとなっている



- 実用的なアプローチとして、光テストベッドのデータを用いたAI/ML研究は、ますます注目を集めている

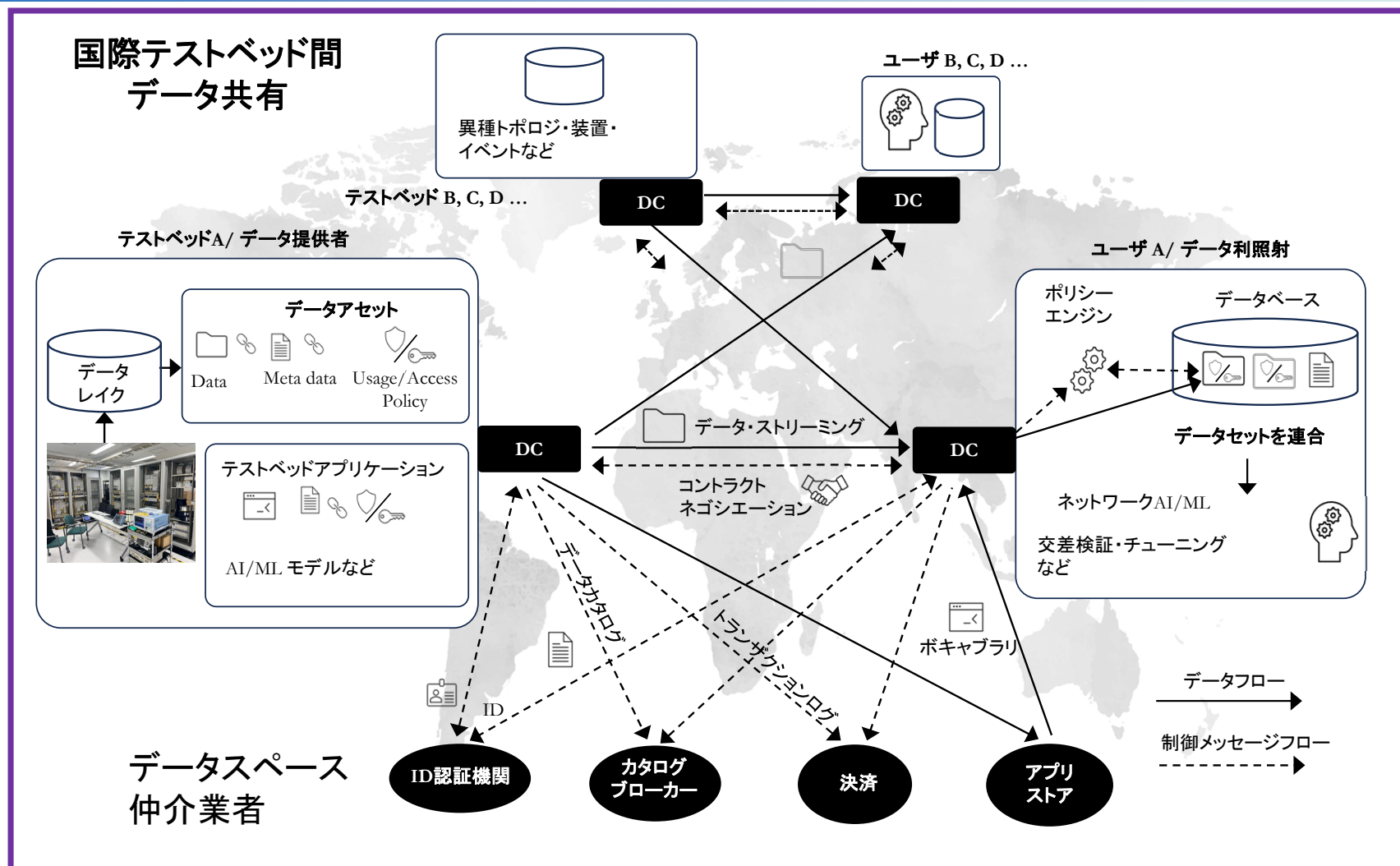
出典：

B. Shariati et al., in OFC2023, M3G.2.

E. Riccardi et al., JLT. 36(15), 3062–3072 (2018).

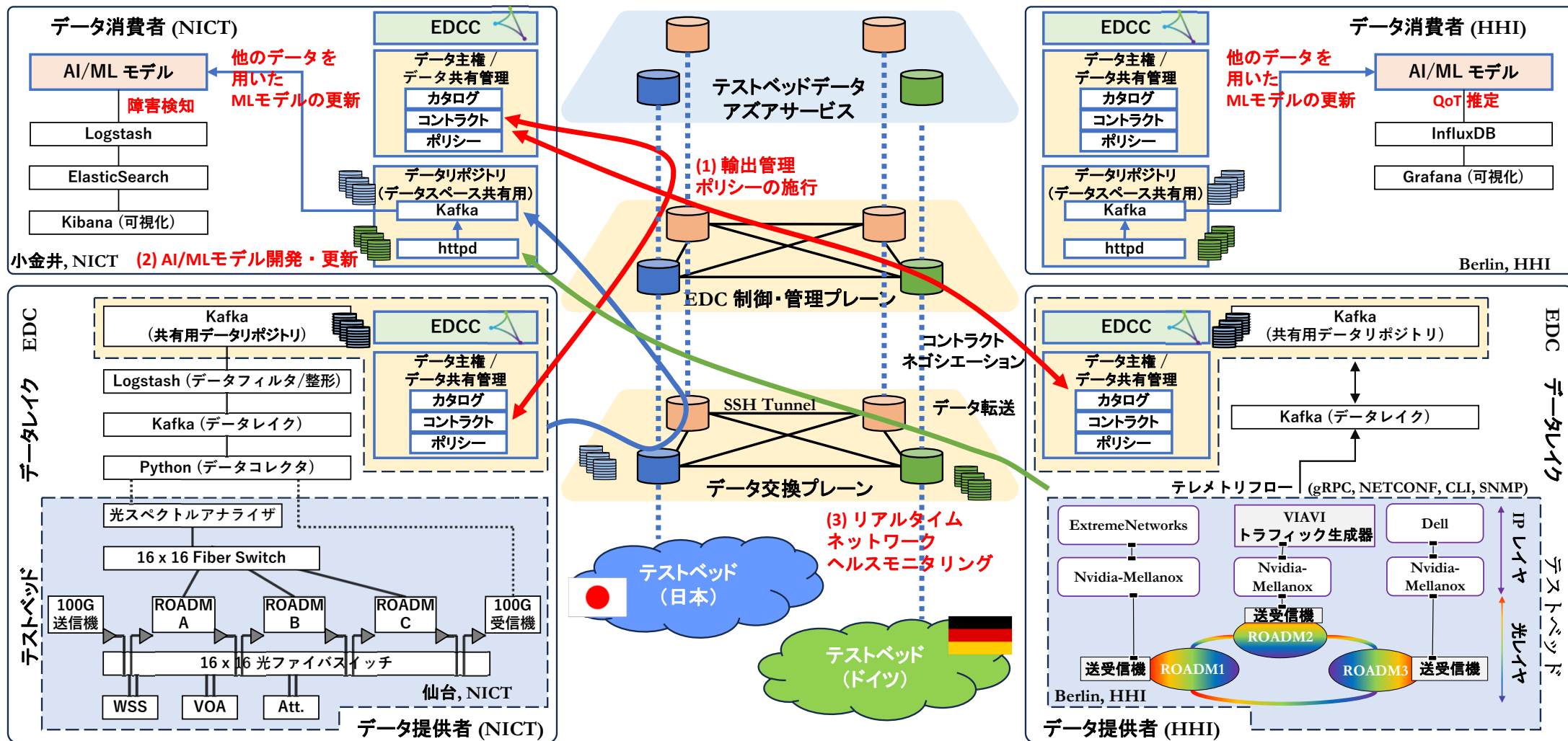
異分野でのデータスペースによるデータ共有の動き

日独B5G連携共同研究 OTDS (Optical Testbed Data Sharing)の提案



国際的な光ネットワークテストベッドデータ共有

NICT OFC2025 デモ展示



出典 : Y. Hirota et al., OFC, M3Z.5, March 2025

EDCC=Eclipse Dataspace Component Connector

NICT 開発したデータカタログのGUIイメージ

EDC Dataspace Network

Stakeholder	Testbed Name
3rdParty	Testbed_of_other_provider
HHI	Optical_Testbeds_through_Optical_Testbed_DataSpace_in_HHI,Germany
NICT_Sendai	Testbed_for_optical_network_experiment_in_Sendai,Japan



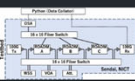
Display policy of selected Asset

Policy ID	Variable	Operator	Value
0	regionLocation	eq	NICT
0	timestamp	gteq	2025-03-15T09:30:00Z
0	timestamp	lteq	2025-04-15T09:30:00Z

Notes: eq: "=", gt: ">", lt: "<", gteq: "≥", lteq: "≤"

EDC Catalog

Search...


```

object ▶ odr:hasPolicy ▶ odr:permission ▶ odr:constraint ▶ 2 ▶ odr:operator ▶
▼ object {9}
  @id : assetId
  @type : dcat:Dataset
  ▼ odr:hasPolicy {5}
    @id : MQ==:YXNzZXRXZA==:Y2IwOTk1ZmMtMTU1NS00N2E2LTkwOTgtYjdhM2UxOWE
    xYjBk
    @type : odr:Offer
    ▼ odr:permission {2}
      ▼ odr:action {1}
        @id : USE
        ▼ odr:constraint {3}
          ▼ 0 {3}
            ▼ odr:leftOperand {1}
              @id : timestamp
            ▼ odr:operator {1}
              @id : odr:lteq
              odr:rightOperand : 2025-04-15T09:30:00Z
          ▼ 1 {3}
            ▼ odr:leftOperand {1}
              @id : timestamp
            ▼ odr:operator {1}
              @id : odr:gteq
          
```

about:blank - Work - Microsoft Edge

about:blank

CSV Content

["IP": "10.11.1.61"]	["Location": "HHI,6th,floor"]	["Vendor": "ADVA"]	["Model": "PSP30000 - 400G QuadFlex"]	["Retrieval_method": "NETCONF"]	["Version_of_framework": "5.1.1"]	["Port": "1/1/r2/op200-interval-indefinite"]	["Measurement_name": "1/1/r2/op200-interval-indefinite"]	["timestamp": "1742887256339935488"]	["pm_data": [{"q_factor": 10.7}]]	["signal_to_noise_ratio": 17.8]	["differential_group_delay": 11.0]	["chromatic_dispersion_compensation": -4.0]	["carrier_frequency_offset": -0.133]	["fec_ber": [{"num_of_bit_errors_per_second": 0.000267847091850871}]]
["IP": "10.11.1.61"]	["Location": "HHI,6th,floor"]	["Vendor": "ADVA"]	["Model": "PSP30000 - 400G QuadFlex"]	["Retrieval_method": "NETCONF"]	["Version_of_framework": "5.1.1"]	["Port": "1/1/r1"]	["Measurement_name": "1/1/r1-interval-indefinite"]	["timestamp": "1742887256395562406"]	["pm_data": [{"optical_power_rx": -19.2}]]	["optical_power_tx": 4.0]	["laser_bias_current": 100.0]	["laser_temperature": 34.9]]		
["IP": "10.11.1.61"]	["Location": "HHI,6th,floor"]	["Vendor": "ADVA"]	["Model": "PSP30000 - 400G QuadFlex"]	["Retrieval_method": "NETCONF"]	["Version_of_framework": "5.1.1"]	["Port": "1/1/r2"]	["Measurement_name": "1/1/r2-interval-indefinite"]	["timestamp": "1742887256469115392"]	["pm_data": [{"optical_power_rx": -12.5}]]	["optical_power_tx": 5.0]	["laser_bias_current": 100.0]	["laser_temperature": 39.3]]		

ONDM2025 Workshop、APC2025、IEEE Summer Topical 2025で招待講演、Top Conference 2026で招待講演予定、新たにAdtran、Bristol大と連携開始、その他CISCO、複数の大学からコンタクト