

第15回

光スイッチング技術・ 最新の光通信関連技術

講義スケジュール(1)

	日付	内容
第1回	10/6	光通信システム(基礎・長距離基幹系)
第2回	10/13	光通信システム(メトロ・アクセス・LAN・インターコネクション)
第3回	10/20	光変調符号
第4回	10/27	光変復調技術(強度変調・位相変調)
第5回	11/10	光変復調技術(デジタル・コヒーレント関連技術)
第6回	11/17	光ファイバのモード特性(波動方程式)
第7回	11/24	光ファイバのモード特性(偏波)
第8回	12/1	ファイバの伝送特性(分散による伝送限界)

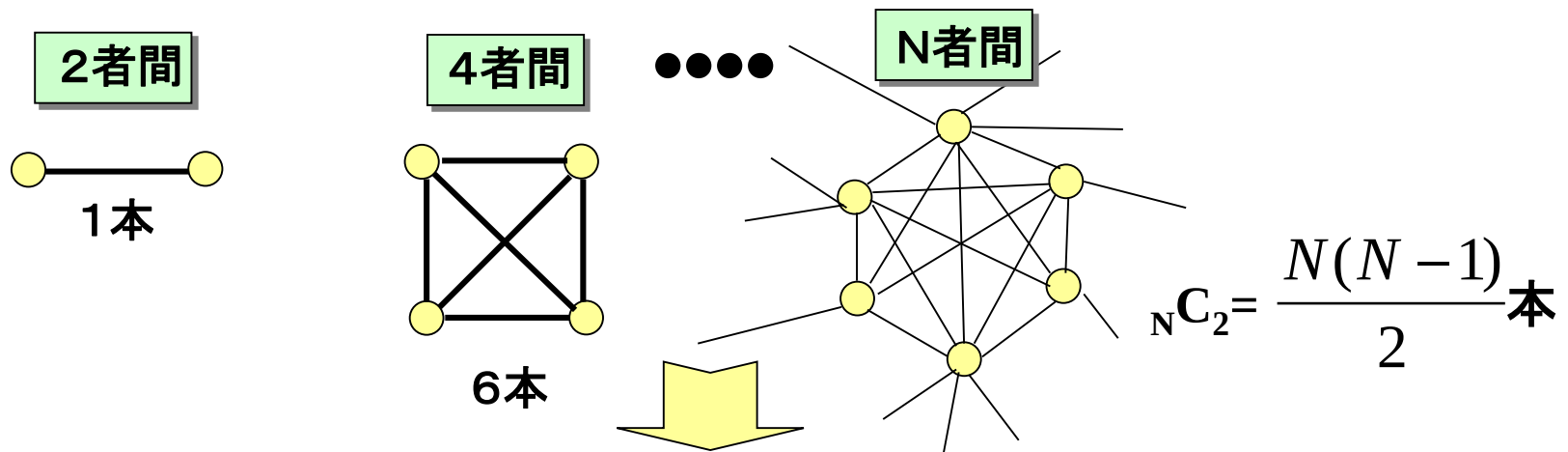
講義スケジュール(2)

	日付	内容
第9回	12/8	ファイバの伝送特性(分散補償技術)
第10回	12/15	光増幅器
第11回	12/22	ビット誤り率(強度変調・直接検波)
第12回	1/5	ビット誤り率(コヒーレント、多値変調、光増幅)
第13回	1/19	波長多重(WDM)伝送(分散マネジメント技術)
第14回	1/26	波長多重(WDM)伝送(変調技術)
第15回	2/2	光スイッチング技術・最新の光通信関連技術

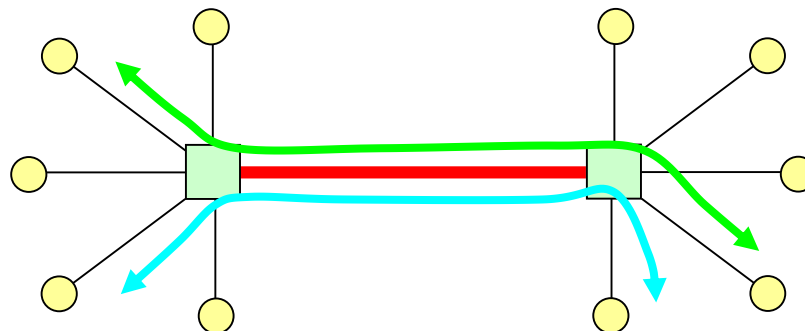
1対1通信から1対多、多対多通信への拡張

スイッチングによる配線・装置の経済的
配置が可能

ユーザ同志をスター配線した場合の通信路の必要数

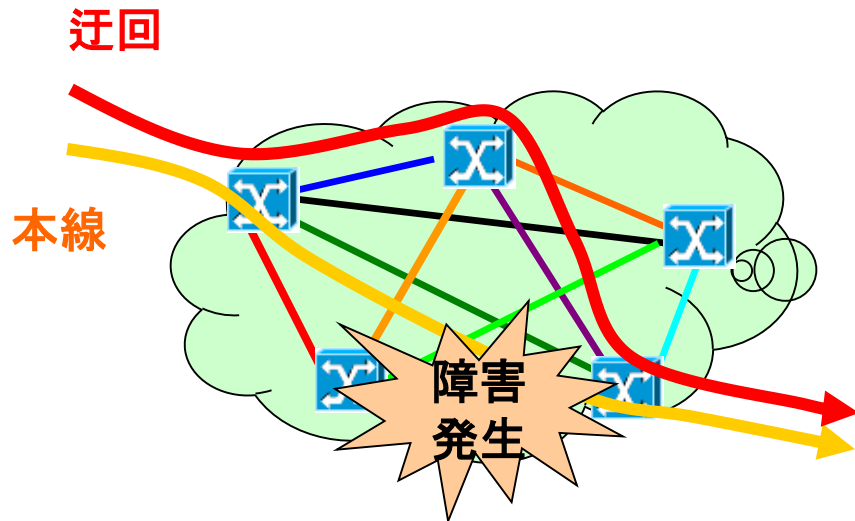


スイッチング・階層構成の導入

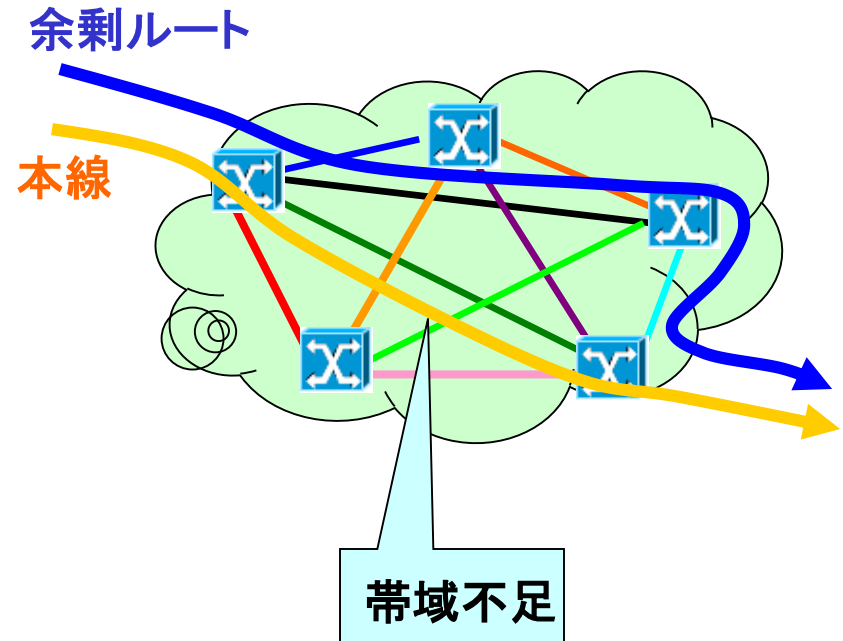


- 通信路の必要数低減
- 装置規模の縮小

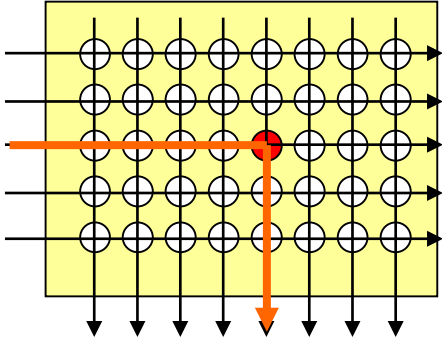
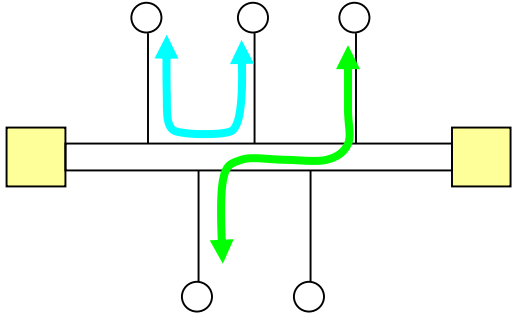
① 障害発生時のルーティング



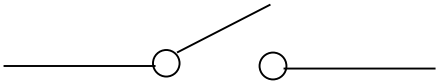
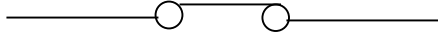
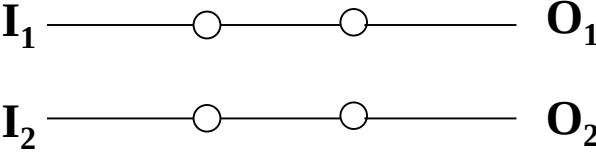
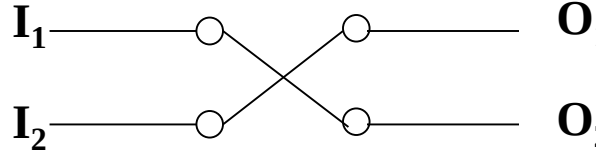
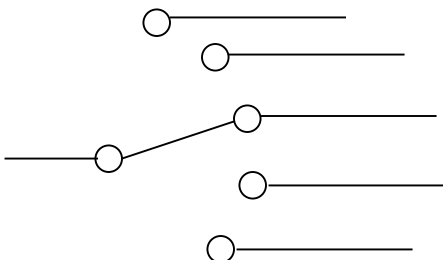
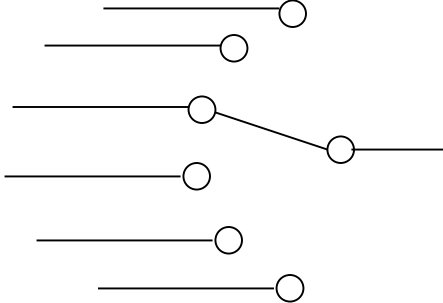
② 帯域不足時の余剰ルートへのルーティング



スイッチング機能の実現方法

スイッチ 形態	媒体専有型スイッチ $N \times M$マトリクススイッチ 	媒体共有型スイッチ 
交換方式	回線交換方式	パケット交換方式

基本スイッチエレメント

ゲートスイッチ	クロスバー型 スイッチ	多値スイッチ (ロータリスイッチ)
OFF状態  ON状態 	バー状態  クロス状態 	1入力多出力型  多入力1出力型 

多端子スイッチ合成法(1)

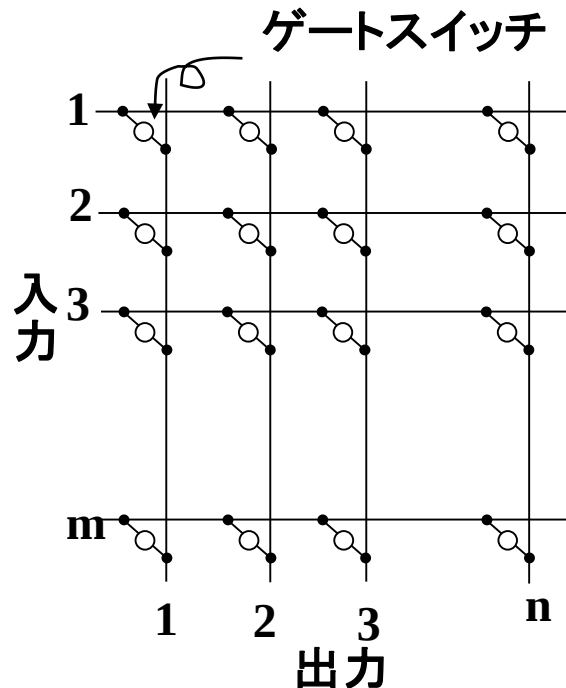
マトリクススイッチ

ゲートスイッチによる構成

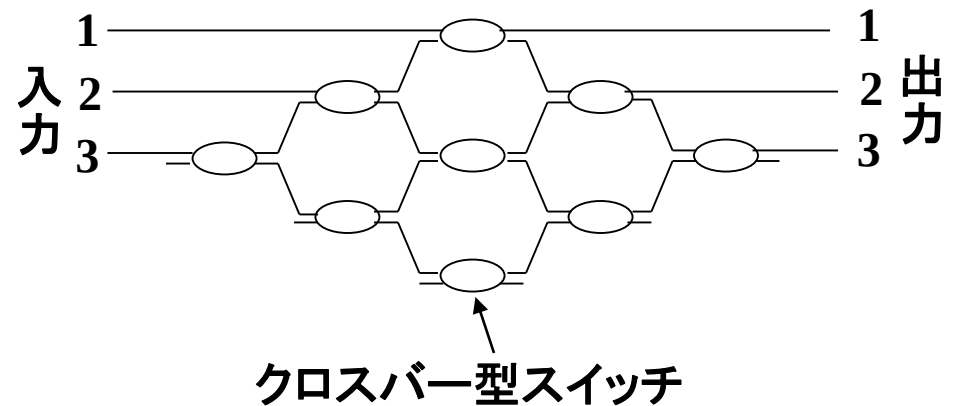
クロスバー型スイッチによる構成

出力線が空き状態であれば任意の入力線と接続可能(完全非閉塞スイッチ)

完全格子型マトリクススイッチ



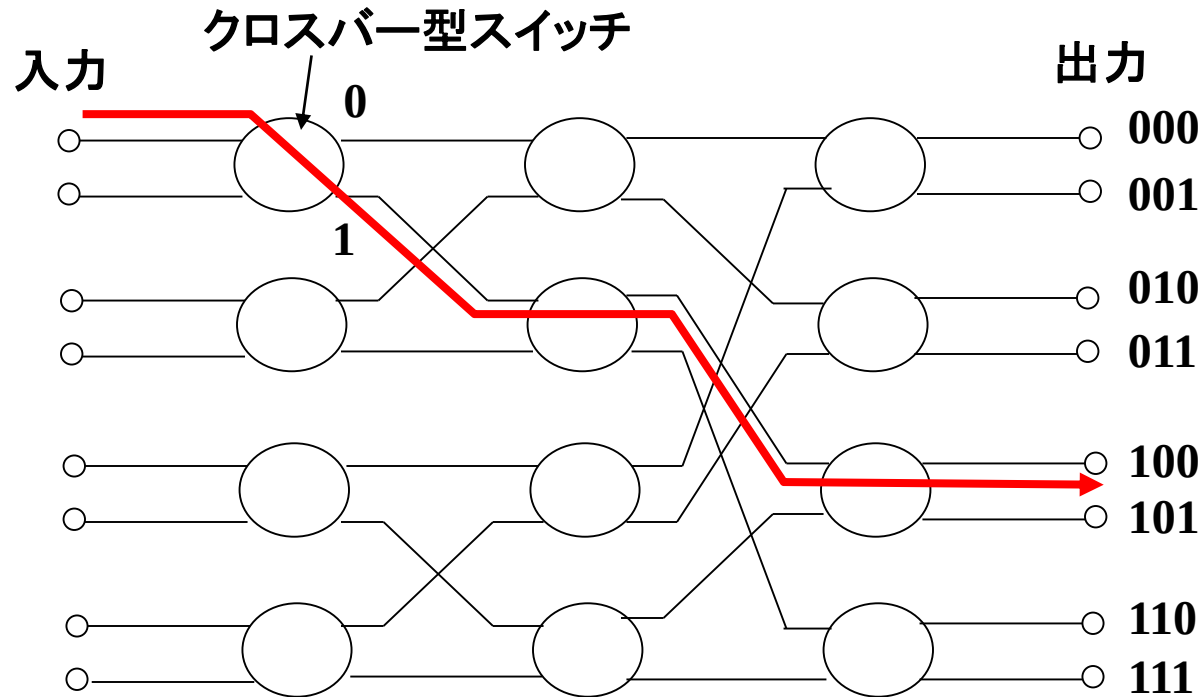
$m \times m$ 完全非閉塞スイッチ



- ・マルチ接続不可
- ・経路による通過スイッチ数の違い

多端子スイッチ合成法

バンヤンスイッチ

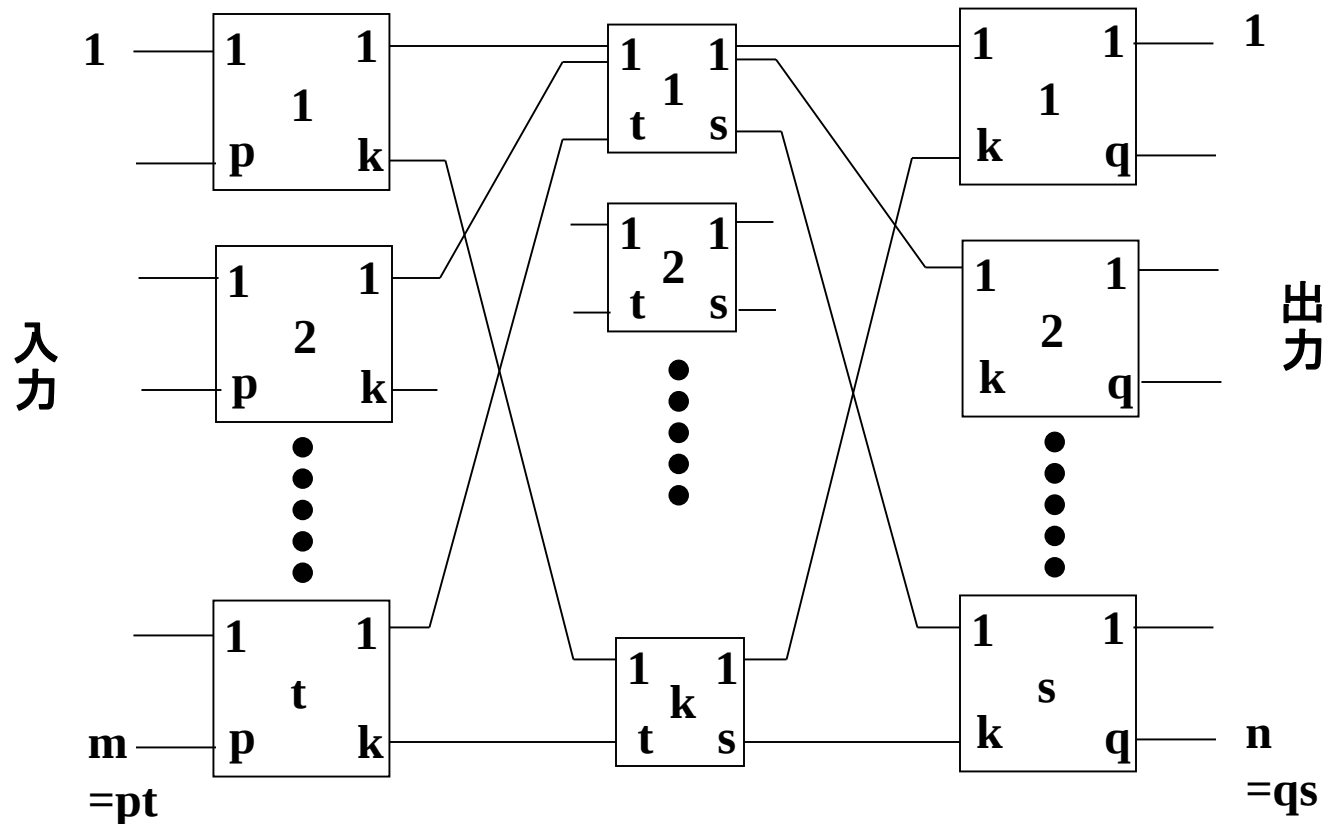


特徴

- 入力信号が行き先情報（ルーティング情報）を持っており、その情報に従ってスイッチを制御（セルフルーティング）
- 内部閉塞型スイッチ
→ 回避方法：出力線番号に応じてスイッチの入力位置を並べ替える（バッチャソーティング網の設置）

多段スイッチ回路網

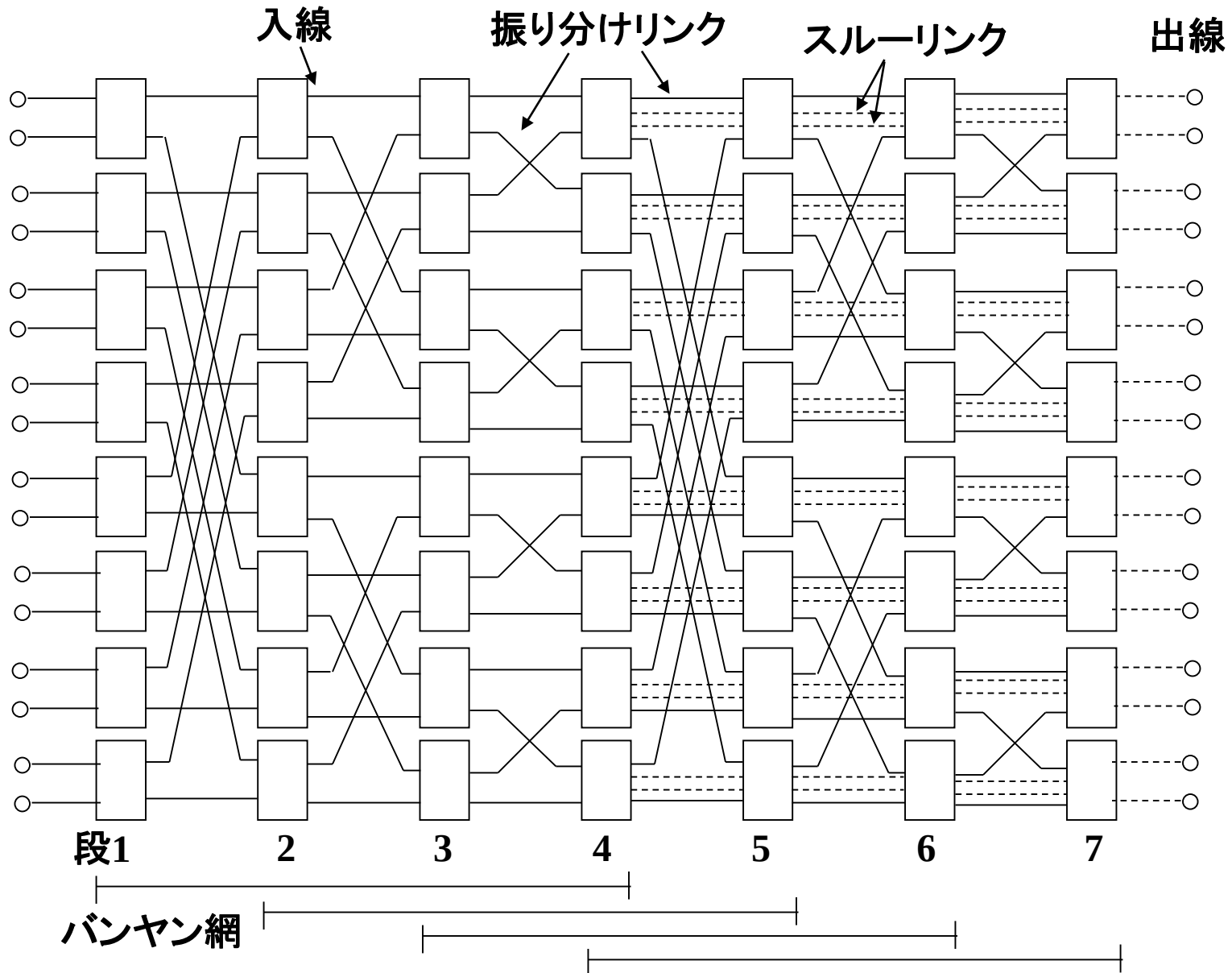
完全格子型マトリクススイッチを用いた多段スイッチ回路網



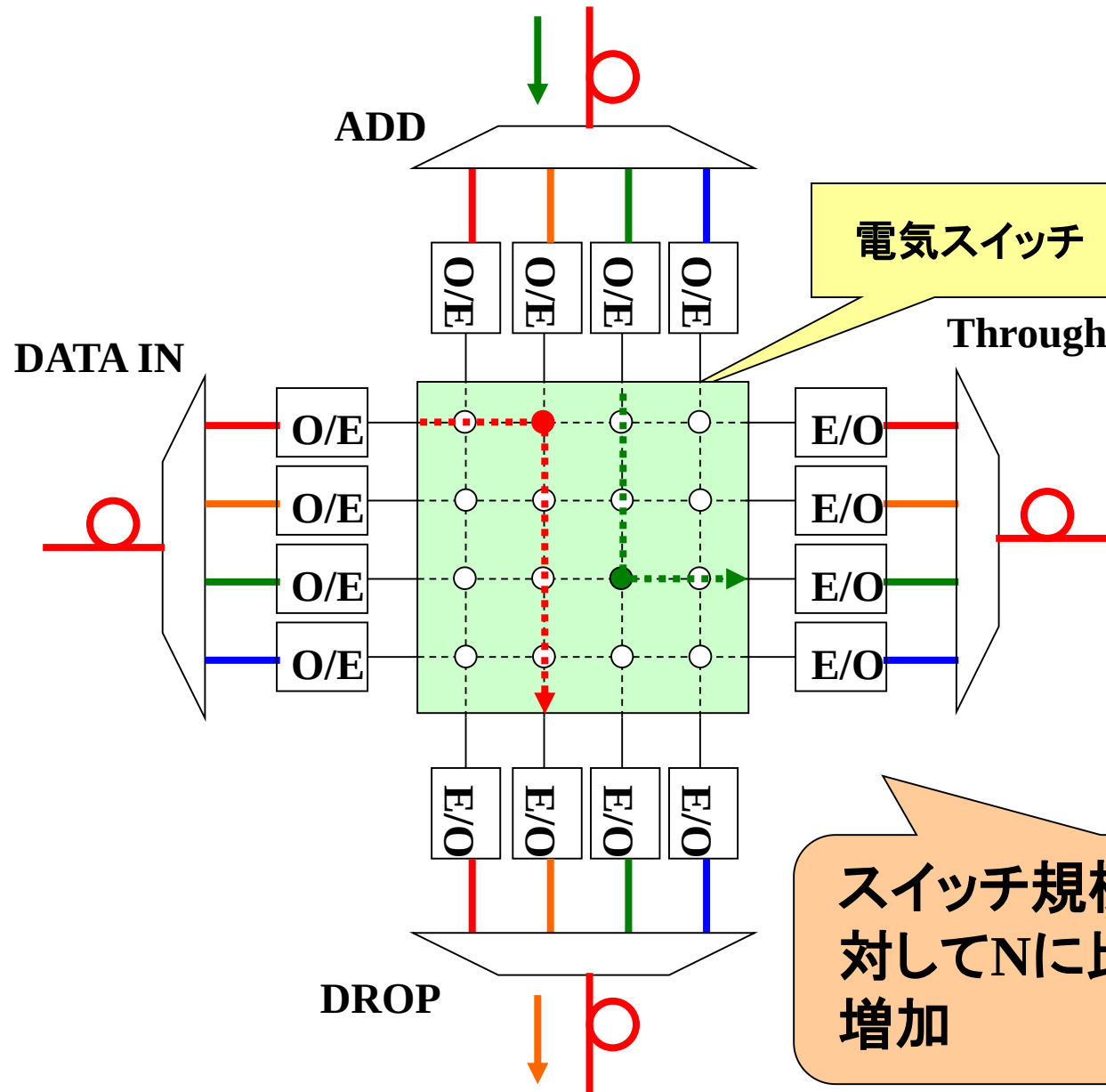
特徴

- $m \times n$ マトリクススイッチより少ない基本スイッチ数で構成可能
- 内部閉塞の発生

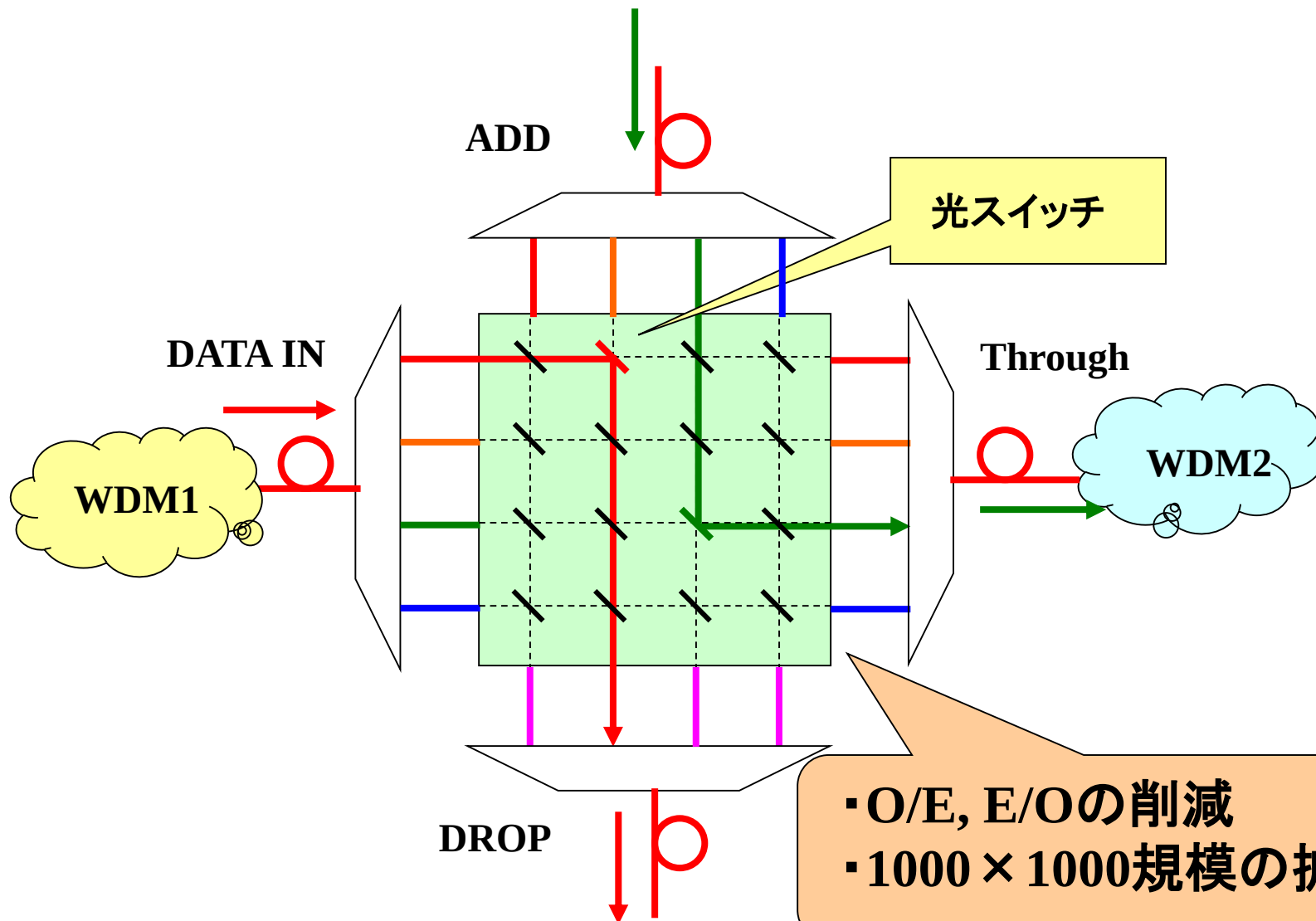
再ルーティング型バンヤン網



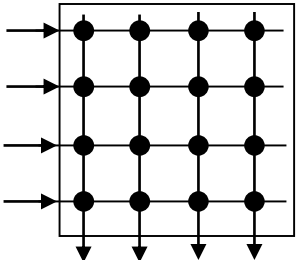
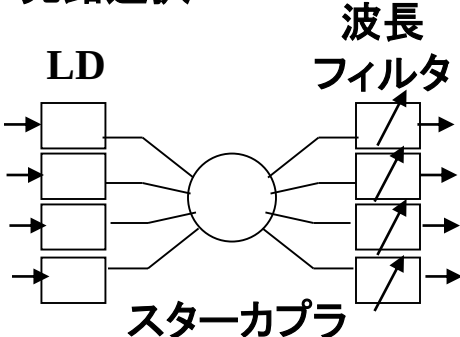
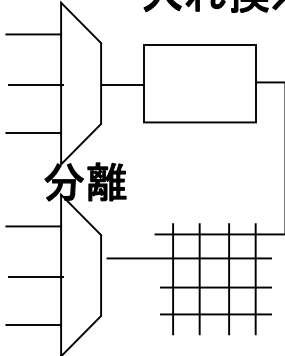
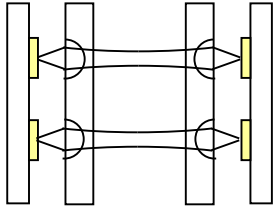
電気スイッチによる構成



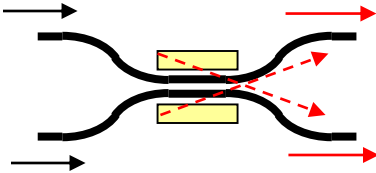
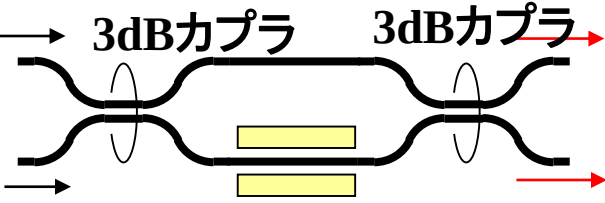
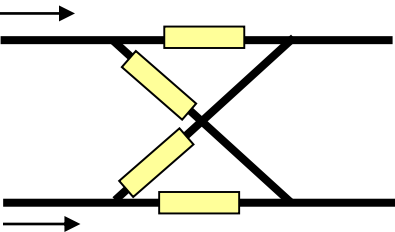
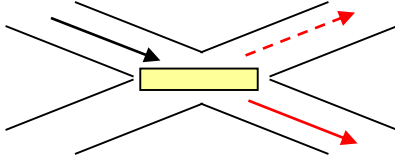
光スイッチによる構成



光スイッチング技術の分類

種類	空間分割型	波長分割多重型	時分割多重型	フリースペース型
構成	空間的に分離された 入出力光路を物理的に 接続／切り替え  m × nスイッチ	波長合波・分波による 光路選択  LD 波長 フィルタ スターカプラ	時間軸上の 制御 多重 時間順序 入れ換え  分離	波長板・偏向素子 を用いた光路 切り替え LD 光学系 PD 
特徴	アナログ・デジタル・ 変調方式・変調速度に 無依存	光の広帯域性	超短光パルスに よる高速化	2次元アレイ化 による高密度化
課題	・スイッチ規模大の時 スイッチ数増大 (N ²) ・曲げ制限	チャンネル間クロストーク	メモリ・バッファ の実現	光学部品のサイズ アライメント

空間分割型光スイッチの種類

種類	形態	制御要素
方向性結合器型		結合部の屈折率変化
マッハツェンダー干渉計型		結合していない導波路部の屈折率変化
LDゲート型		ゲート部の利得・吸収
全反射型		交差部の屈折率変化
		全反射ミラーの有無

光スイッチの動作に用いられる物理現象

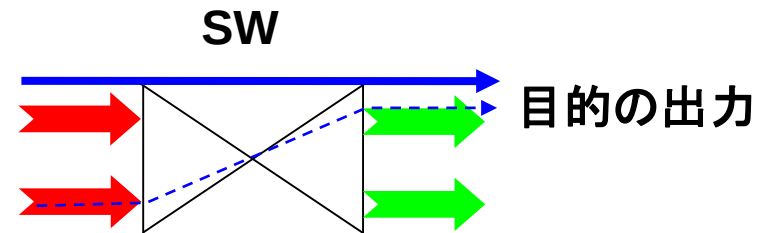
動作原理		材料	動作速度
屈折率変化	熱光学(TO)効果	石英系 ポリマー系	msオーダー
	電気光学(EO)効果 ポッケルス効果: 1次 カー効果: 2次	誘電体: LiNbO_3	psオーダー
	プラズマ効果	半導体: InGaAsP , AlGaAs	nsオーダ
	フランツ・ケルディツシュ効果	半導体バルク: InGaAsP , AlGaAs	psオーダー
	量子閉じ込めシュタルク効果(QCSE)	半導体MQW	psオーダー
吸収変化	フランツ・ケルディツシュ効果	半導体バルク: InGaAsP , AlGaAs	10ps~ns
	量子閉じ込めシュタルク効果(QCSE)	半導体MQW	10ps~ns
利得変化	誘導放出	半導体	nsオーダ
機械的位置変化	ミラー位置	金属・半導体・オイル	msオーダ

マトリクス光スイッチの特性比較(例)

方式		機関	サイズ	挿入損失	ON/OFF比	備考
半導体	反射	横河電機	6×6		15dB	
		U. Bristol	4×4	14dB	50dB	SW 1ns
	EAMゲート	NTT	1×8	15dB	50dB	SW 10ns
	SOAゲート	Cambridge	16×16	lossless	15dB	SW 10/3ns
	SiPhoto-MZI	AIST	32×32	20dB		Xtalk 35dB
	フェースドアレイ	東大	8×8, 1×100	38dB	25～34dB	SW 4ns
	波長スイッチ	NTT, UCSB	8×8			SW 10ns
誘電体	石英TO型	NTT	16×16, 1×128	6.6dB	55dB	
	ポリマーTO型	Akzo	8×8	10.7dB	30dB	PDL 0.5dB
		Berlin I.T.	4×4	12.8dB	29dB	
	LiNbO ₃	NEC	8×8	11dB	20dB	PDL 1dB
	液晶	NTT	64×64	9.5dB	26dB	PDL 0.2dB
		CNET	8×8	9dB		SW 3ms, PDL<3dB
機械	Si-MEMS	Lucent	112×112	7.5±2.5dB		Xtalk 50dB SW < 10ms
		UC, Berk.	64×64	5.1dB	65dB	SW 0.9μs
バブル	Si+オイル	Agilent	32×32	2.5-7.5dB		Xtalk 50dB SW <10ms

光スイッチのクロストークの影響

クロストーク: 他チャネルの信号が目的とする
チャネルに混入する割合



- コヒーレントクロストーク:
信号とクロストーク光間に位相の相関が存在する
- インコヒーレントクロストーク:
信号とクロストーク光間に位相の相関がない

➡ 受信光のSNR劣化の要因

パワーペナルティ(PP):

$$PP = 10 \log \frac{P_s'}{P_s} = -5 \log \left\{ 1 - \frac{1}{4} Q^2 (ct_1 + ct_2 + ct_3) \right\} \quad [\text{dB}]$$

ct_i : 第 i 段の光SWのクロストークと出力光に対応する比例定数

波長スイッチのクロストークの影響

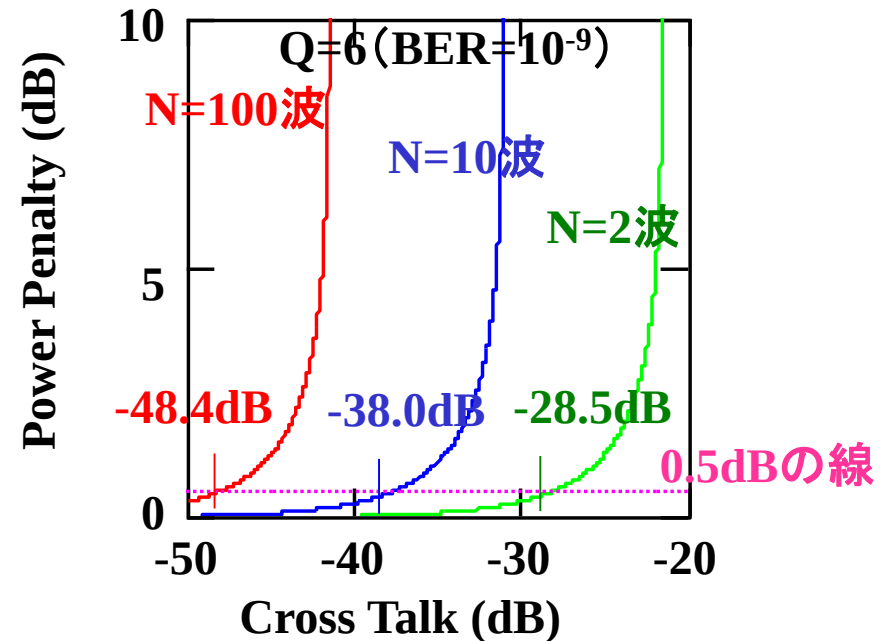
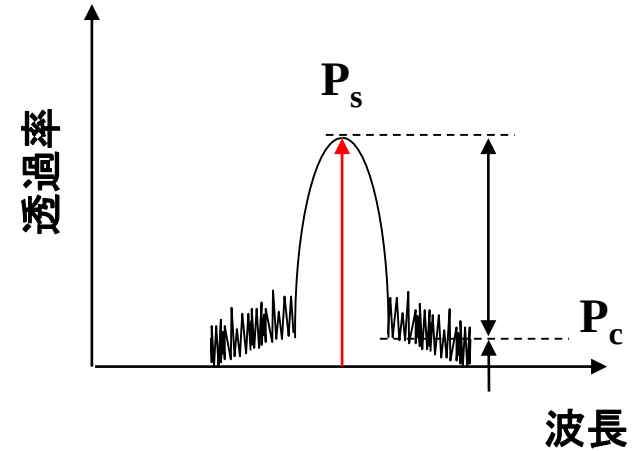
パワーペナルティ:

$$PP = 10 \log \frac{P_s'}{P_s} = -5 \log \left\{ 1 - 4(N-1)Q^2 R_c \right\} \quad [\text{dB}]$$

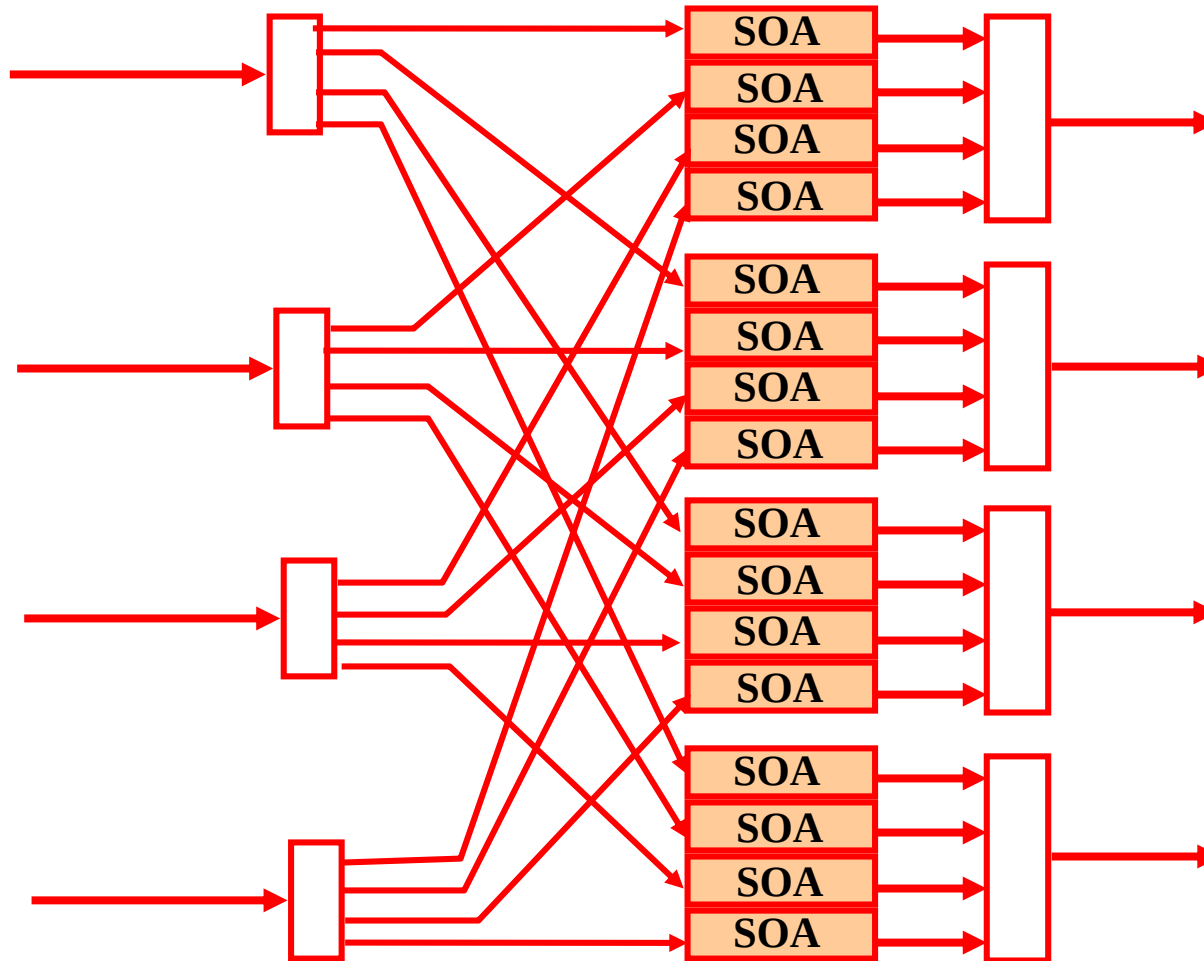
N: 波長チャネル数

Q: 信号のQ値

R_c: 波長クロストーク $R_c = \frac{P_c}{P_s}$

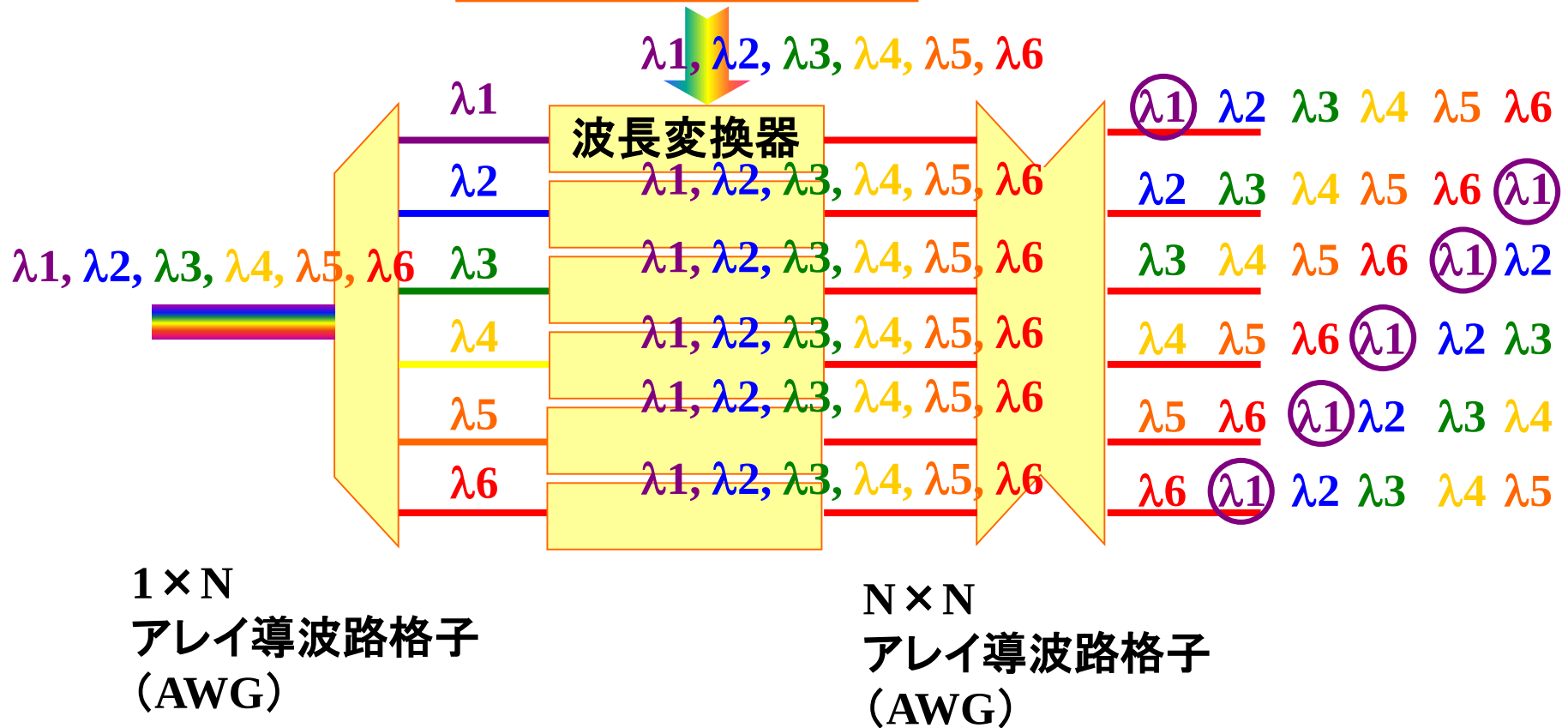


N入力・N出力のN×Nスイッチ → N^2 個のSOAが必要



波長スイッチング

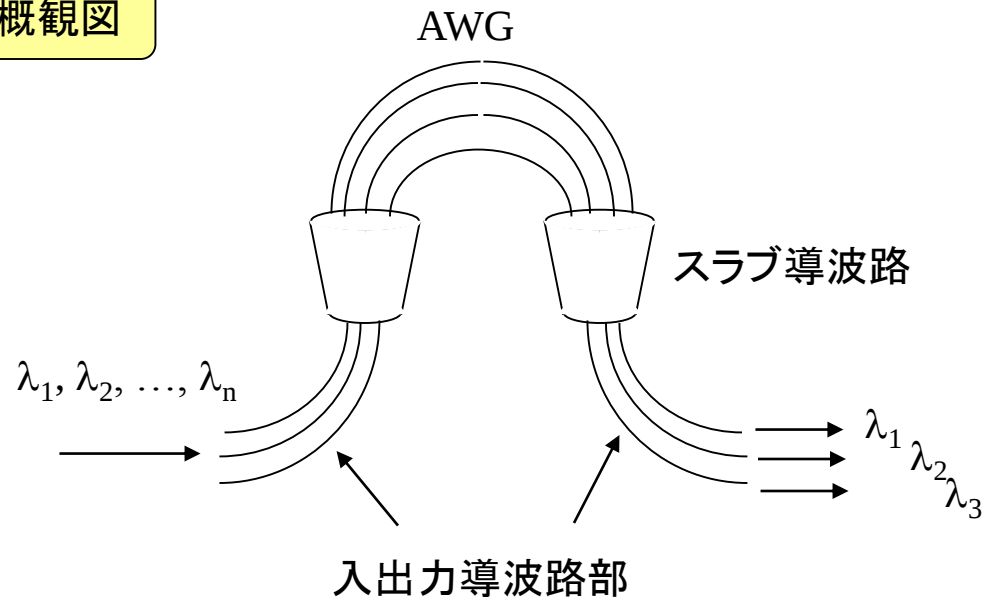
波長選択／可変光源



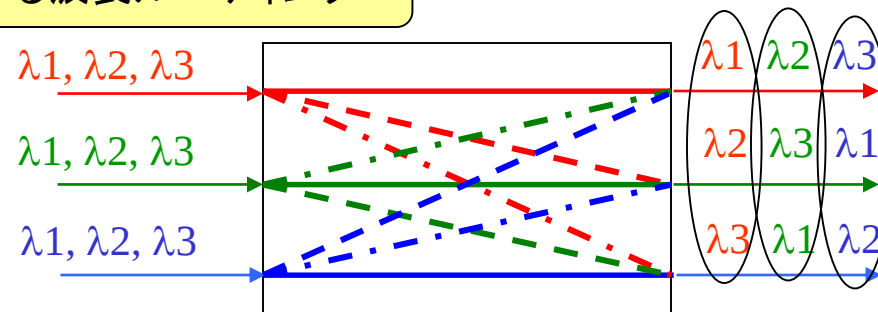
電氣的・機械的スイッチ機構が不要

N × N AWGによる波長ルーティング

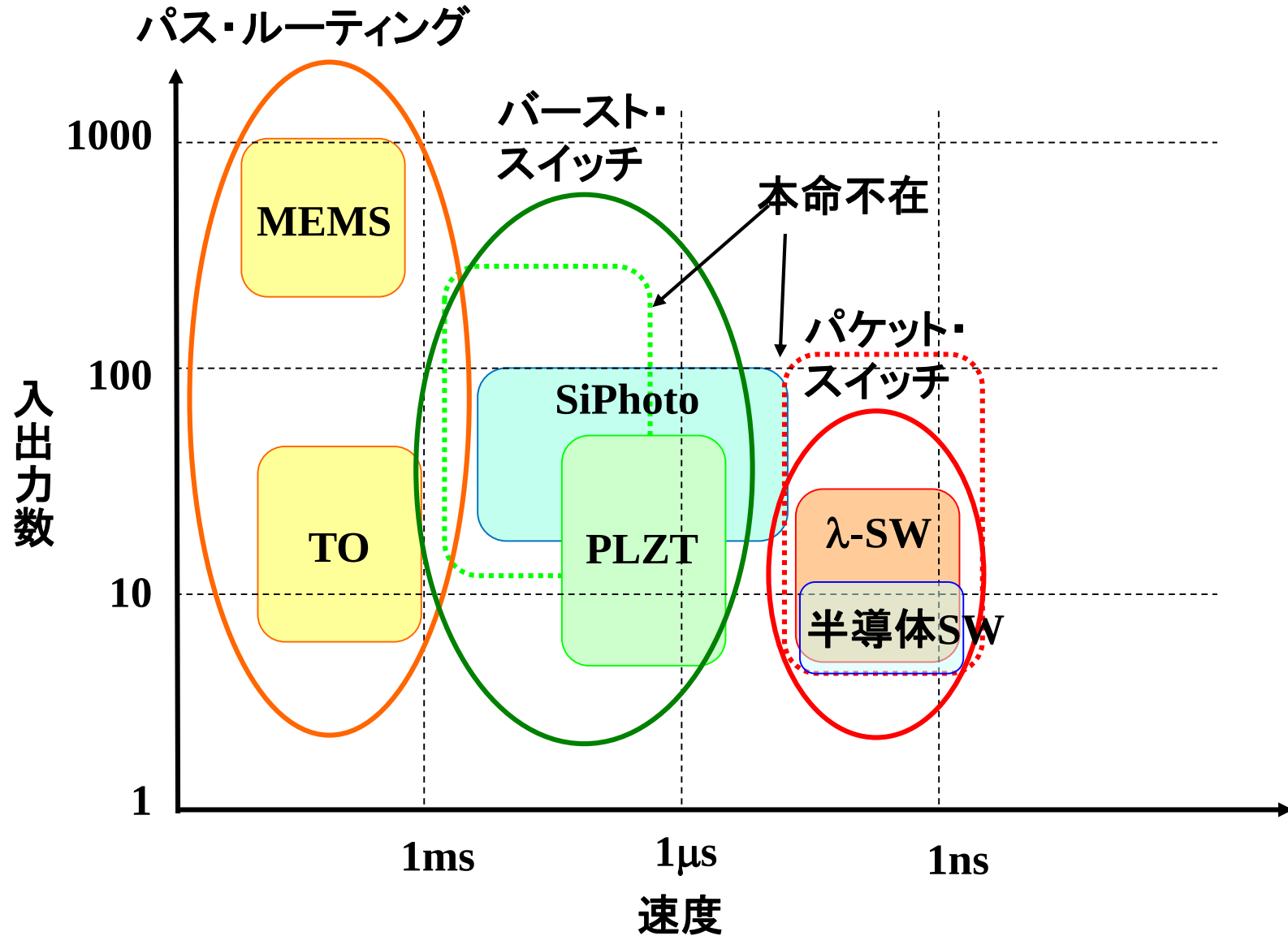
AWG概観図



AWGによる波長ルーティング



各種光スイッチの適応領域



(1) 規模とスイッチ数

$N \times N$ マトリクススイッチではスイッチ規模に対して
 2×2 スイッチ数が N^2 で増加

(2) 素子サイズ

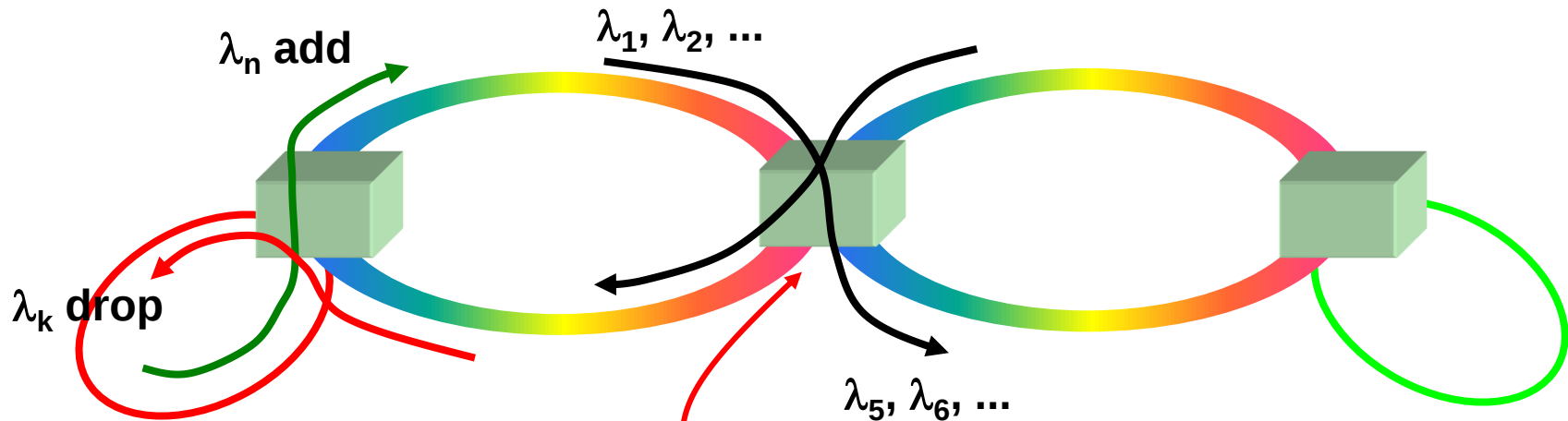
- ・曲率半径による制約
- ・屈折率差／吸収差を大きくするため導波路長増大

ROADMと波長選択スイッチ

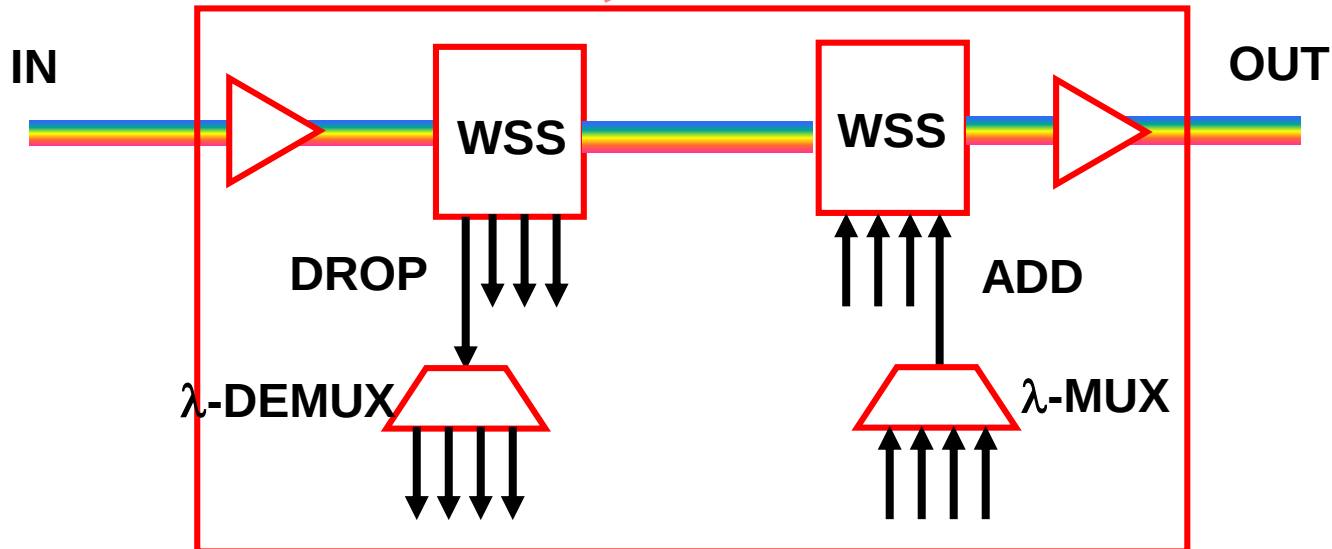
参考文献: 尾中(富士通), NGN時代の光技術・産業懇談会第1回公開討論会資料(2007.5.15)

リングネットワークに用いられるROADM

Interconnected Ring Network Topology



ROADM : Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer



※ WSS : Wavelength Selective Switch

光ルーティング技術に対する期待

● ネットワーク構築／再構築の自動化（OPEX削減・網構築期間短縮）

- ・光波長経路設定を自動化・遠隔制御化したい
局舎に行って手作業での膨大な数のファイバコード接続や送受信器の波長設定をできるだけ避けたい
- ・λ VPNなどの新サービスの提供

● 機器間ファイバコード接続数の削減

- 手作業でのファイバコード接続箇所を少なくしたい
→ 波長ごとに分離せず、WDMインタフェースが望ましい

● 再生中継無しでのマルチリング接続や多方向波長経路切替

- トランスポンダを省き、λ直収とすることで機器コストを低減させたい

● 円滑なマイグレーションの実現

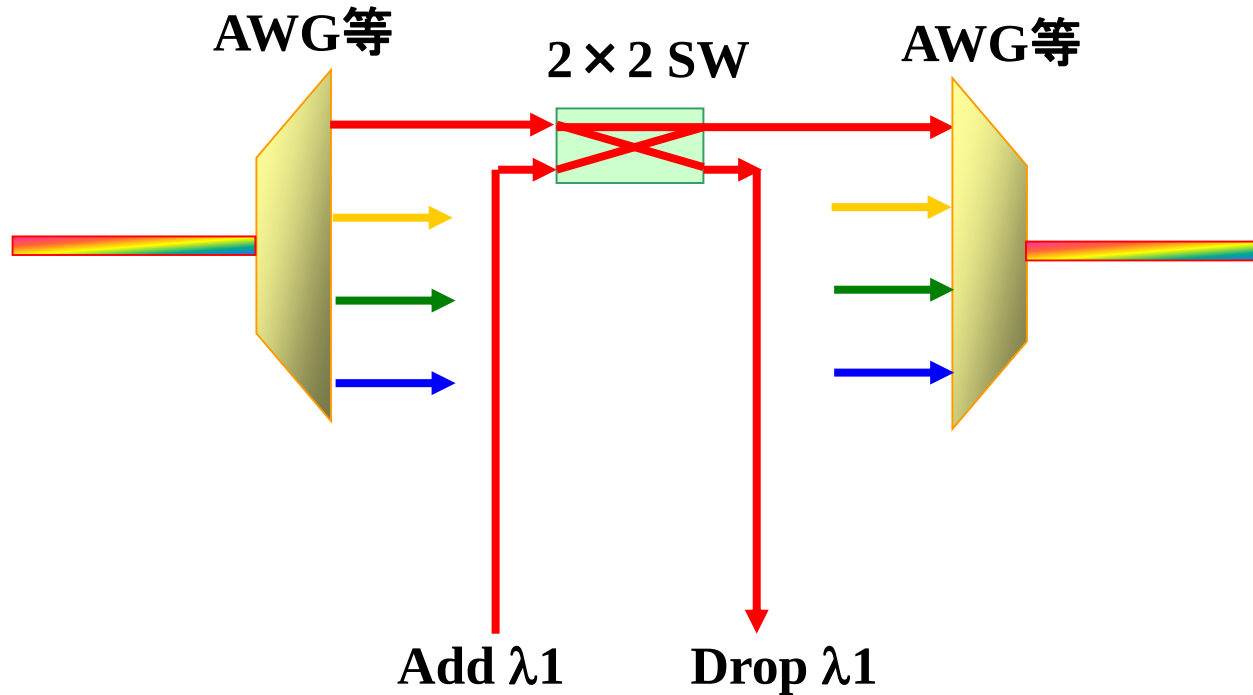
- 需要見合いで少数波長ROADMから大規模PXC(HUB)まで自由に拡張したい
共通ユニットで、すべてのノード構成をカバーしたい(在庫品種削減)

ROADMノードに求められる機能

- 16ノード以上の多段接続 ➡ ノードNFの低減、透過帯域拡大
(SONETとのアナログ、1000km伝送を念頭)
 - Drop & Continue (Multi or Broadcast) 機能
 - ROADMからPXC(HUB)へのインサービス拡張性
- } ノード構成最適化
- 任意ノード間の伝送特性確保 ➡ リンクごと100%分散補償、VDC/EDC
 - 任意の波長配置を許容 ➡ SHB抑圧EDFA
 - 1波 ⇔ 最大波長間の波長数急変耐力 ➡ サージレス高速応答EDFA
 - プラグ&プレイ操作 ➡ 各種光レイヤのモニタ、GMPLS連携
 - 40G Ready ➡ 透過帯域拡大、ノードNF低減、最適変復調方式の選択
 - ネットワーク設計の簡素化 ➡ ネットワーク設計ツール提供

Reconfigurable OADM (ROADM)(第1世代)

固定波長選択



特徴

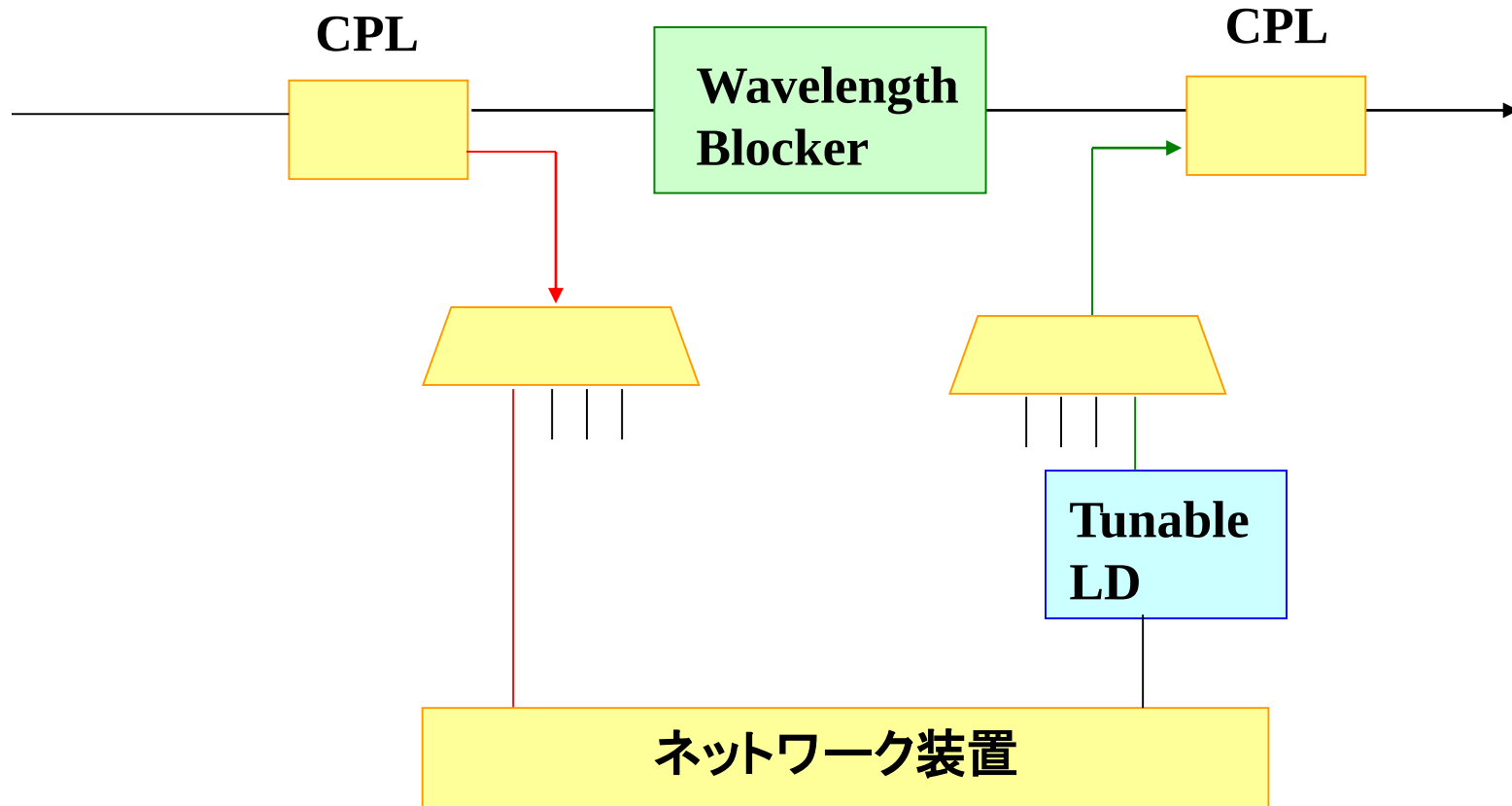
- ・自動調整
- ・規模の拡張性

デメリット

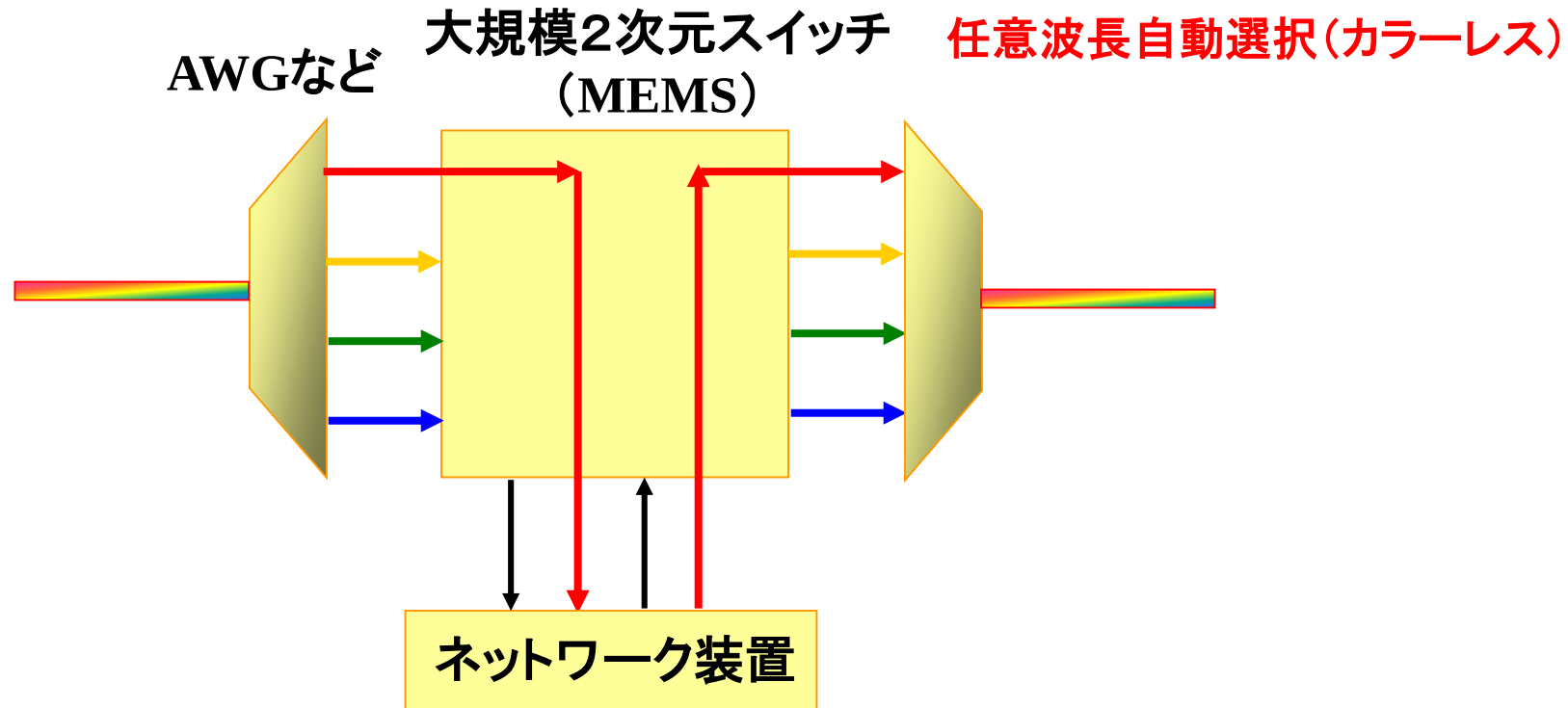
- ・初期コスト代大
- ・損失大

Reconfigurable OADM (ROADM) (Broadcast & Select type) (第2世代)

固定波長選択／任意波長挿入



Reconfigurable OADM (ROADM) (3次元MEMS型)(第3世代)



特徴

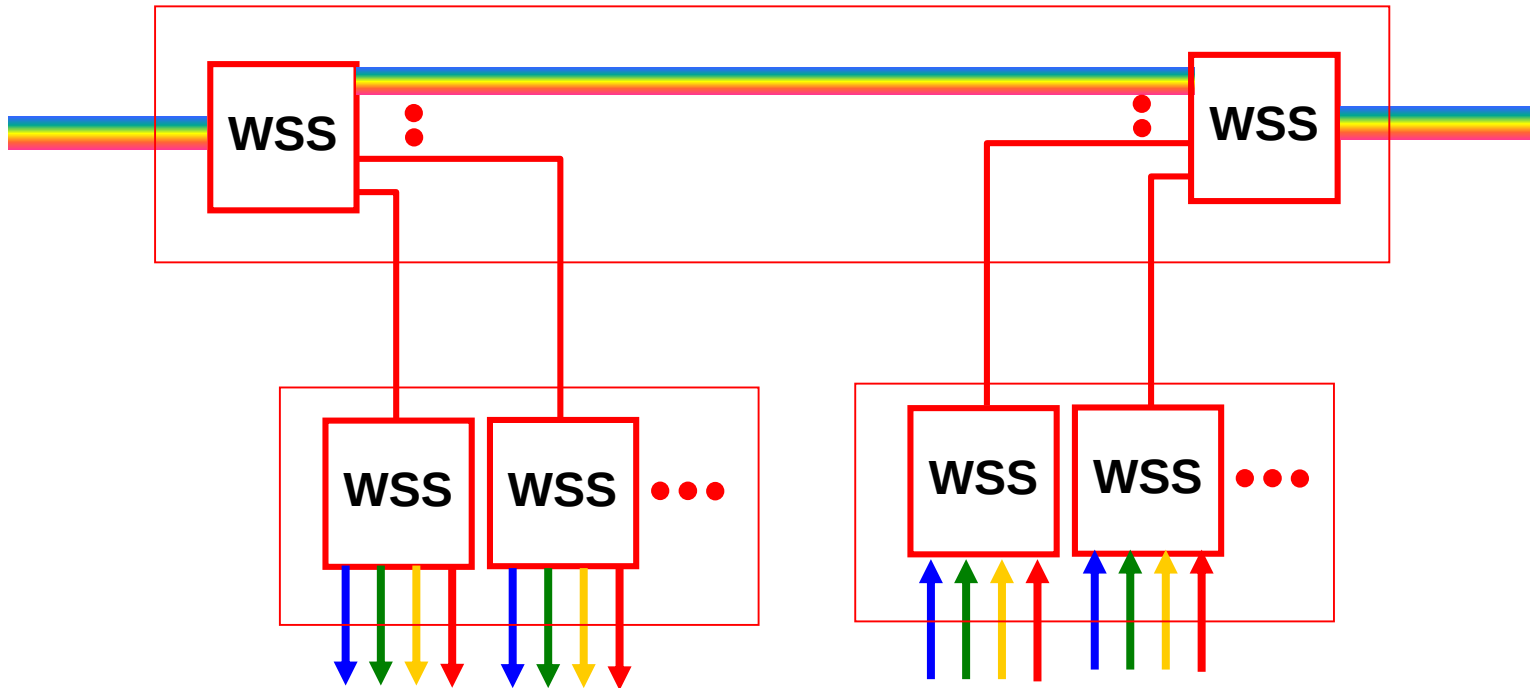
- ・任意のポート間の挿抜が可能
- ・拡張性

デメリット

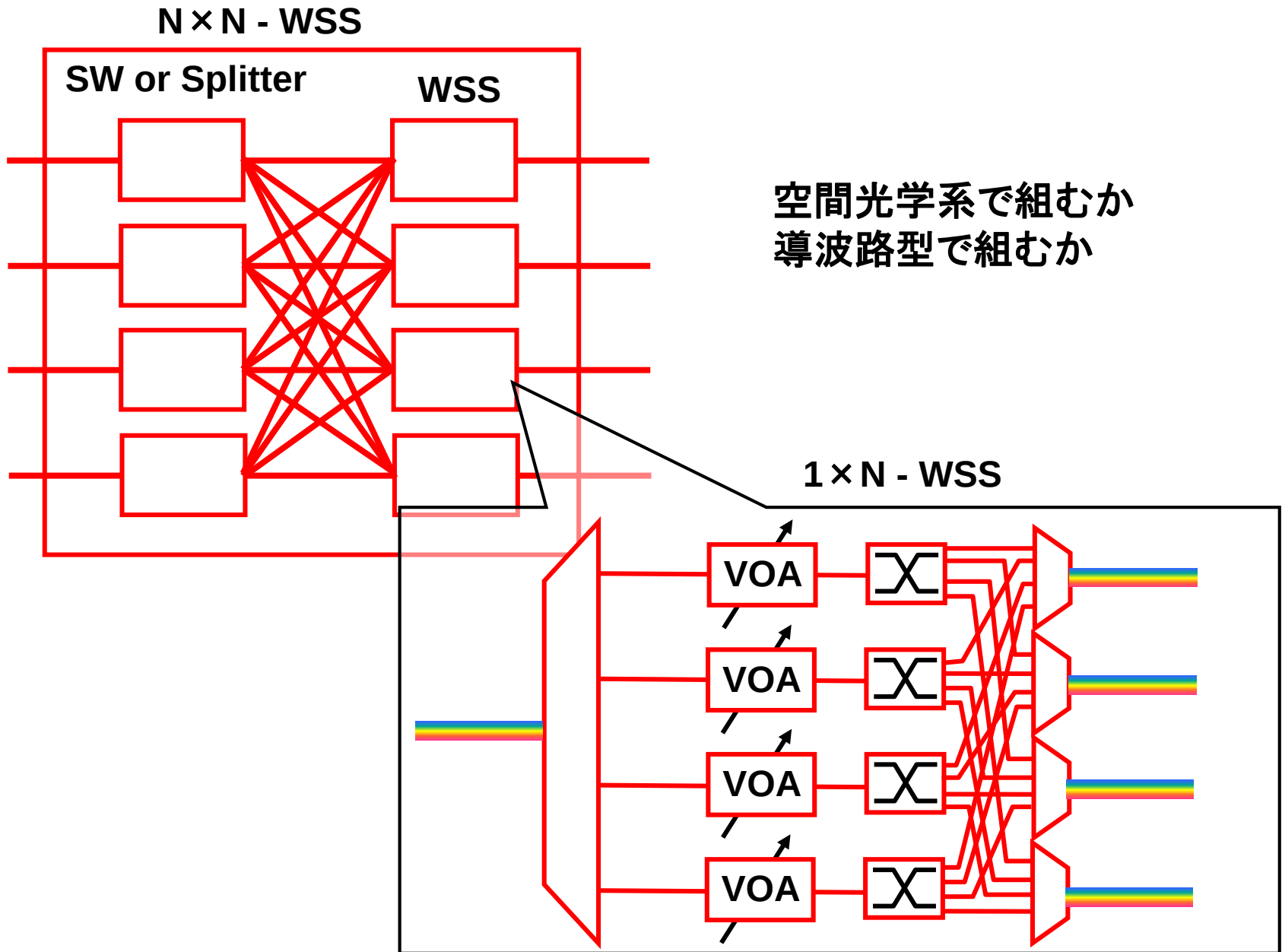
- ・損失大
- ・波長管理が複雑

Reconfigurable OADM (ROADM) (波長選択スイッチ型)(第3世代)

任意波長自動選択(カラーレス)

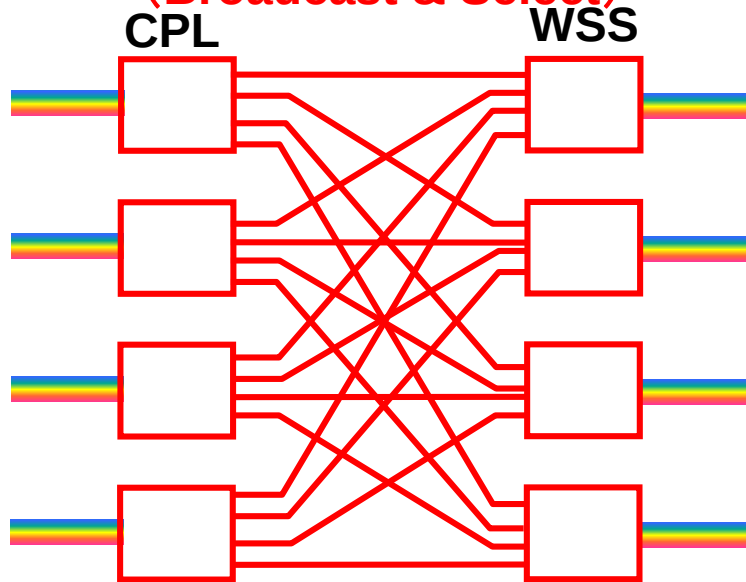


WSSの構成



WSSを用いたPXCの構成

光プラ+WSSタイプ (Broadcast & Select)



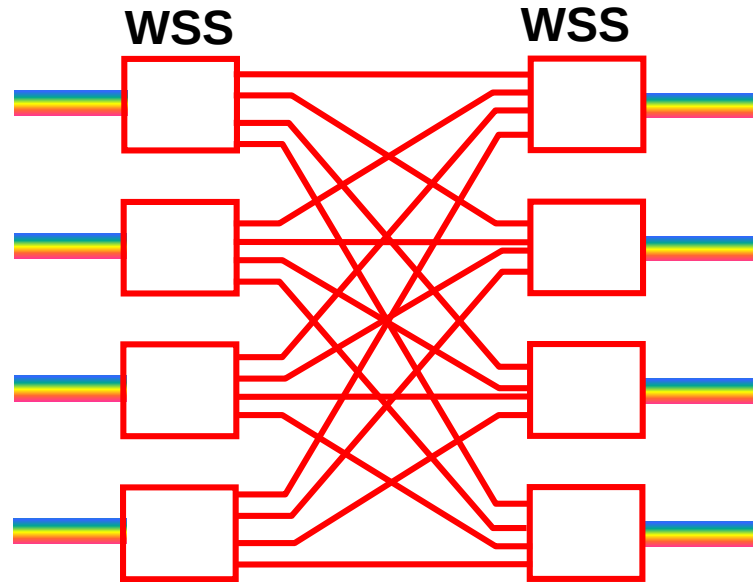
メリット

- 低価格
- Multi/Broadcast機能をサポート

デメリット

- ノード損失大
- クロストーク特性が劣化

フルWSSタイプ (Route & Select)



メリット

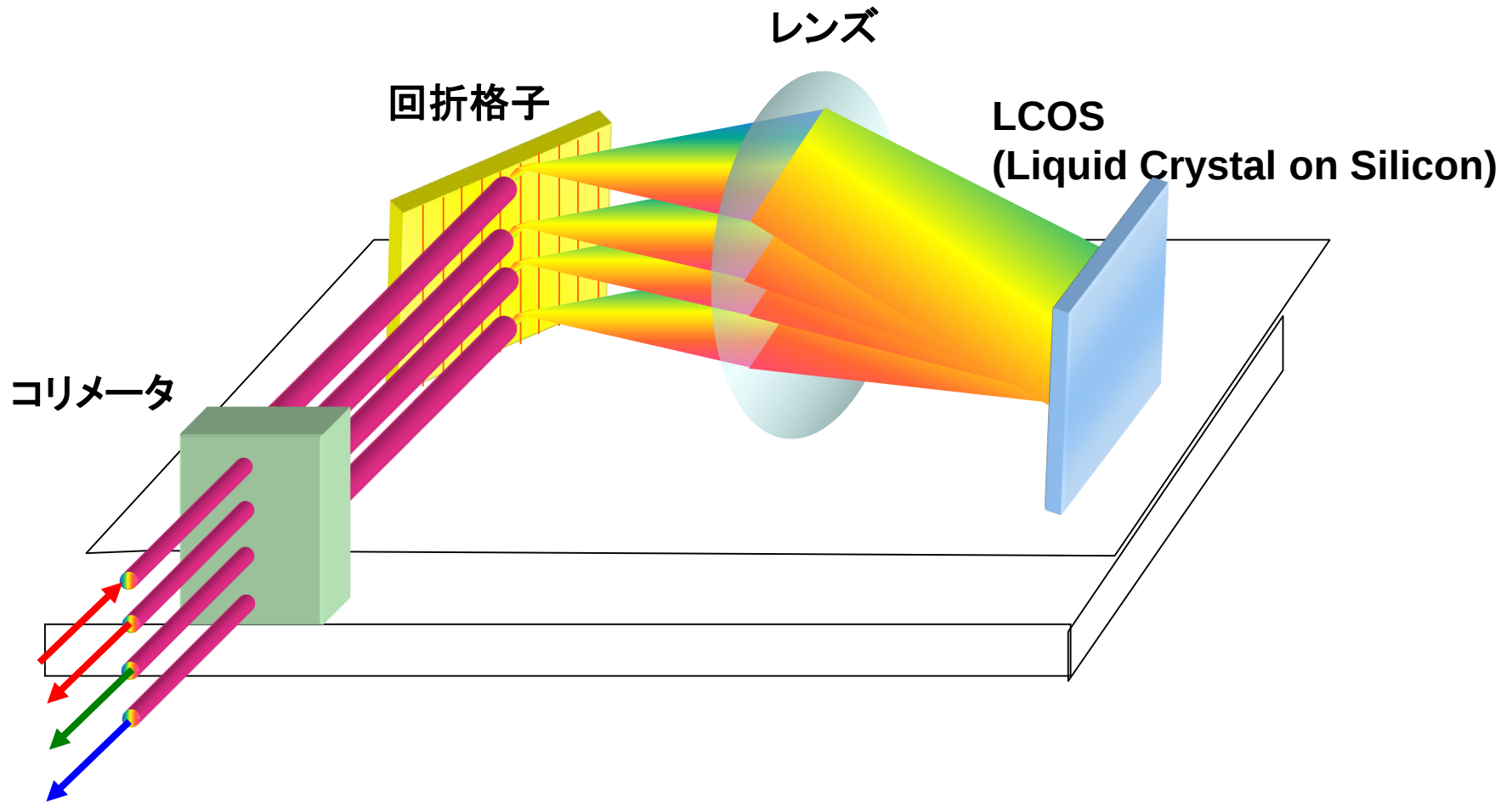
- 低損失
- クロストーク抑圧が可能

デメリット

- Broadcast/Multi機能が実現できない
- 高コスト

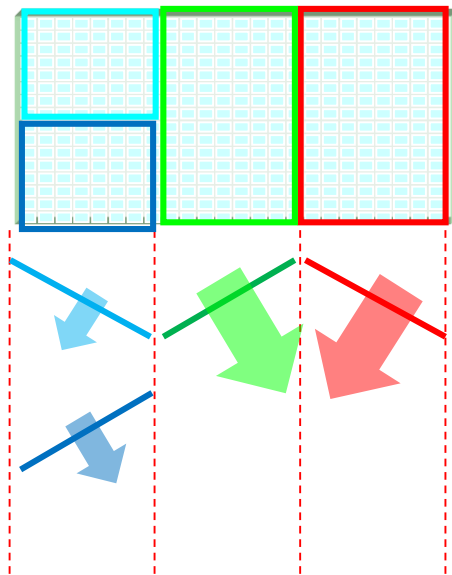
- 任意波長の任意ポートへのスイッチング
カラーレス動作、波長群単位での切替が可能
- 小型・低損失
3D MEMSマトリクスSW+AWGと比較して、ノード損失とサイズを大幅に低減可能
- 信号光パワー調整機能（VOA機能）
WDM光増幅中継伝送に伴う波長間のパワー偏差を補償
- 高い拡張性
PXCの方路数のインサービス拡張が可能
- 広帯域かつ平坦な通過帯域
従来型光MUX/DEMUXに比べ、広帯域かつ平坦な通過帯域を持つため、伝送可能ノード数の拡大が可能。

波長選択スイッチ (Wavelength Selective Switch, WSS)



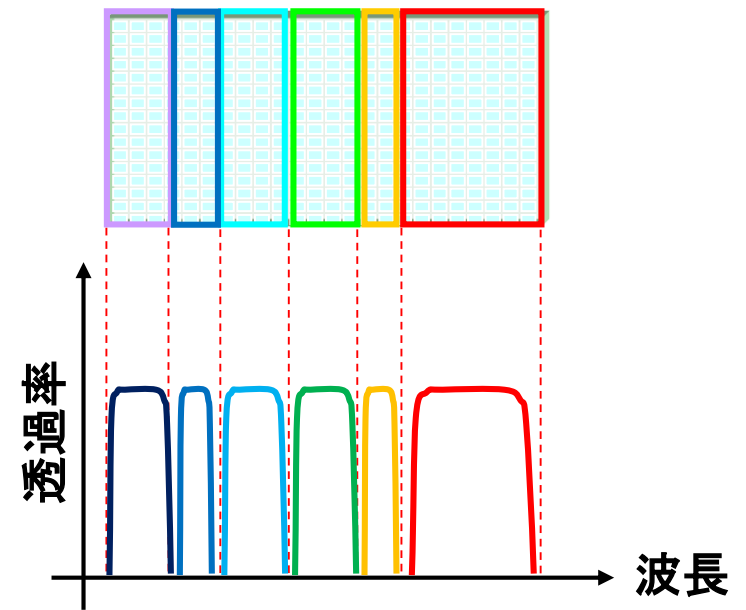
LCOSによる光スイッチング

波面制御



- 出力光の方向を切替
- マルチキャスト対応

グリッドレス



- 水平方向の範囲可変
→ 帯域可変・グリッドレス

WSSによるスイッチング動作

