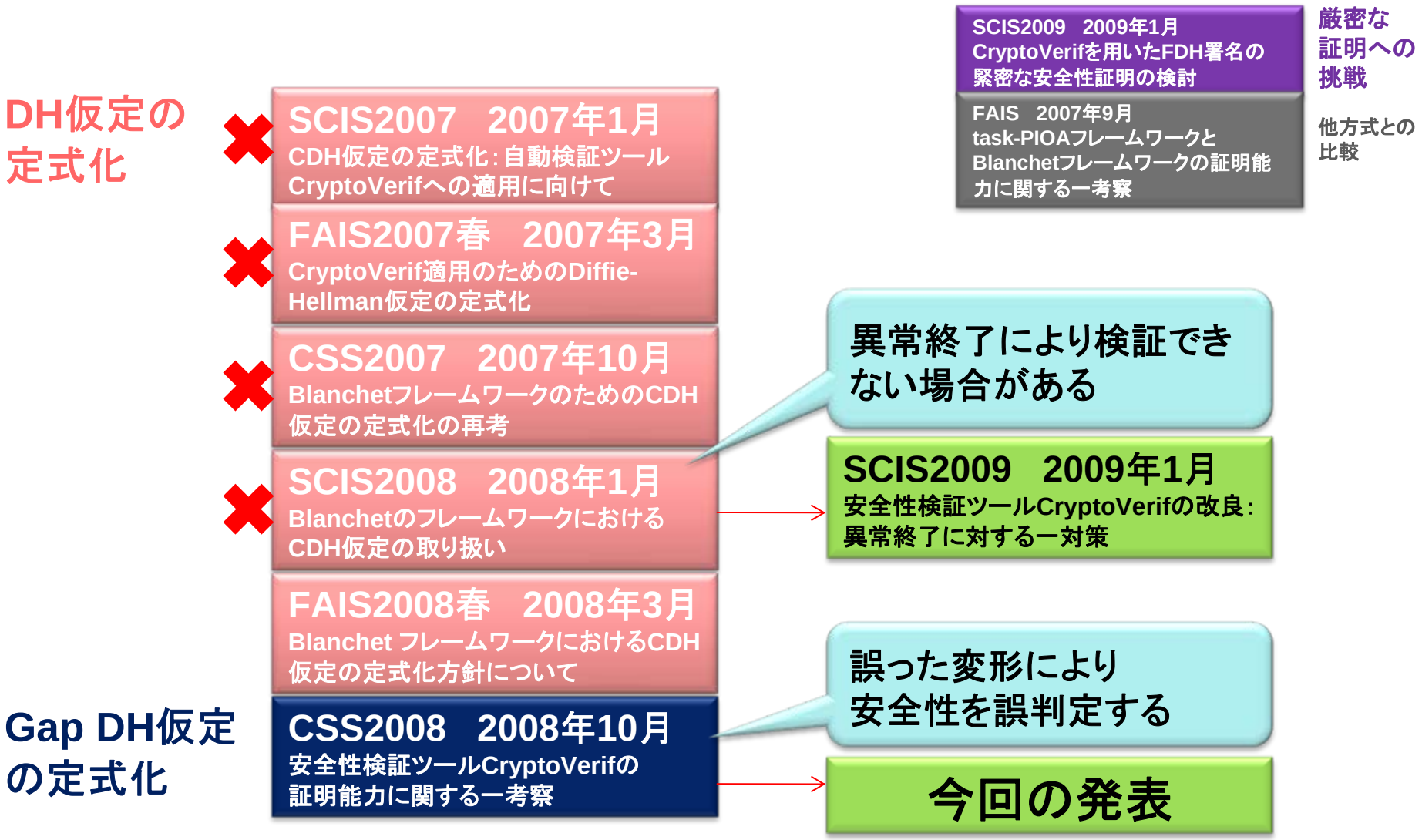
TOSHIBA
Leading Innovation

CryptoVerif の証明能力の改良：誤った判定の回避

◎ 花谷 嘉一 †
角野 陽輔 ‡
米山 一樹 ‡
太田 和夫 ‡

† 株式会社 東芝
‡ 電気通信大学

我々の発表論文の関係


SCIS2009　2009年1月
CryptoVerifを用いたFDH署名の緊密な安全性証明の検討
FAIS　2007年9月
task-PIOAフレームワークとBlanchetフレームワークの証明能力に関する一考察
厳密な証明への挑戦
他方式との比較
DH仮定の定式化
SCIS2007　2007年1月
CDH仮定の定式化：自動検証ツールCryptoVerifへの適用に向けて
FAIS2007春　2007年3月
CryptoVerif適用のためのDiffie-Hellman仮定の定式化
CSS2007　2007年10月
Blanchetフレームワークのための CDH仮定の定式化の再考
SCIS2008　2008年1月
Blanchetのフレームワークにおける CDH仮定の取り扱い
異常終了により検証できない場合がある
SCIS2009　2009年1月
安全性検証ツールCryptoVerifの改良：異常終了に対する一対策
FAIS2008春　2008年3月
Blanchet フレームワークにおけるCDH仮定の定式化方針について
Gap DH仮定の定式化
CSS2008　2008年10月
安全性検証ツールCryptoVerifの証明能力に関する一考察
誤った変形により安全性を誤判定する
今回の発表

発表の流れ

- **CSS2008 で行った発表**
  - 背景
  - FDH署名とGDH署名の安全性証明
  - 考察
- **defined( ) と otheruses( )**
- **対策案と効果の考察**
- **まとめ**

研究動機 (CSS2008@沖縄)

- **CryptoVerif ってどれくらい証明能力があるんだろう？**
  - 既存研究：方式の検証例
    - FDH署名，[BR93]のPKE，鍵交換プロトコルなど ・・・ Blanchet ら
    - Authenticated Encryption 関係 ・・・ 荒井ら@信州大
    - DH鍵交換（弱い意味での安全性）・・・ 花谷ら
  - 既存研究：書き換え規則の定式化
    - 落とし戸付き一方向性置換，ランダムオラクル，各種プリミティブ ・・・ Blanchet ら
    - CDH仮定，DDH仮定 ・・・ 花谷ら

GDH署名の安全性証明ができるか調べてみよう！

ランダムオラクルモデル，Gap DH仮定の下で
FDH署名とほぼ同じ手順で証明可能な方式．[BLS01]

ランダムオラクル：**Blanchetが定式化済．**

Gap DH仮定 ⇦ CDH仮定 + DDHオラクル 

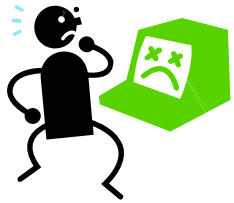
CSS2008の内容 (CSS2008@沖縄)

証明能力を探るために，色々な方式の安全性証明をしてみよう！

今回の対象：GDH署名：ランダムオラクルモデル，Gap DH仮定．

FDH署名とほぼ同じ手順で安全性証明可能．

- Gap DH仮定の定式化
- 指数法則の定式化
- GDH署名に対する偽造ゲームの定式化



Gap DH仮定を適用する前に 安全性証明がついてしまった．

明らかに 誤った証明！

CryptoVerifで用いるランダムオラクルの記述に問題がありそうだ．

取り敢えず問題を回避する方法は見つけた．

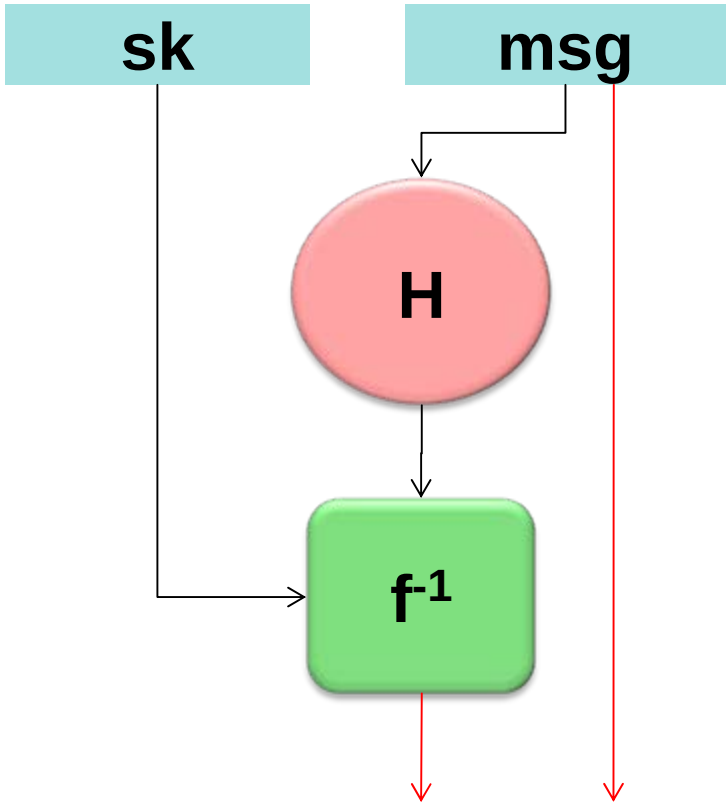
発表の流れ

- **CSS2008 で行った発表**
  - 背景
  - FDH署名とGDH署名の安全性証明
  - 考察
- **defined( ) と otheruses( )**
- **対策案と効果の考察**
- **まとめ**

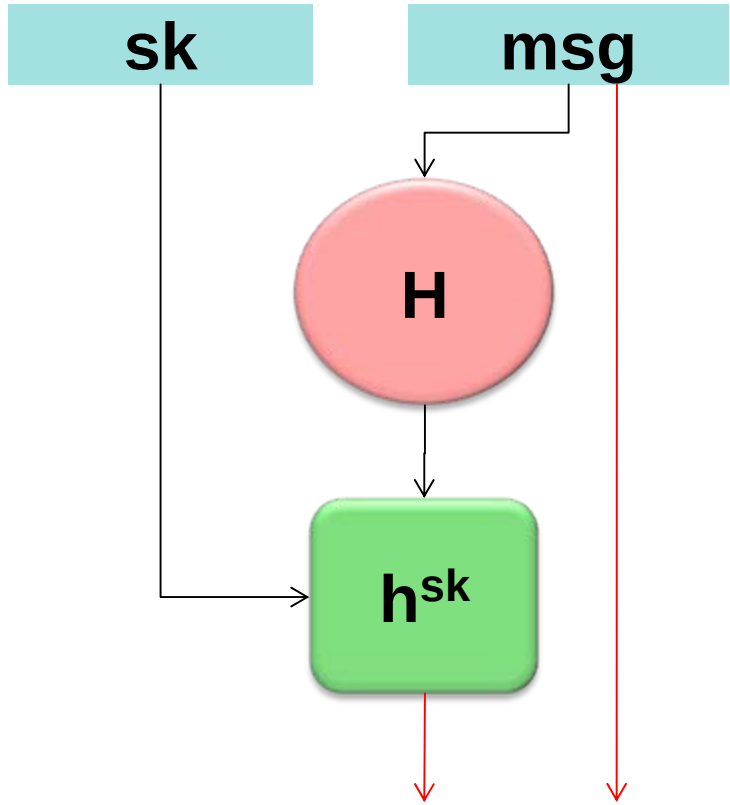
FDH署名とGDH署名

(CSS2008@沖縄)

FDH署名



GDH署名



計算量的仮定は異なるが,
FDH署名と同様に安全性証明可

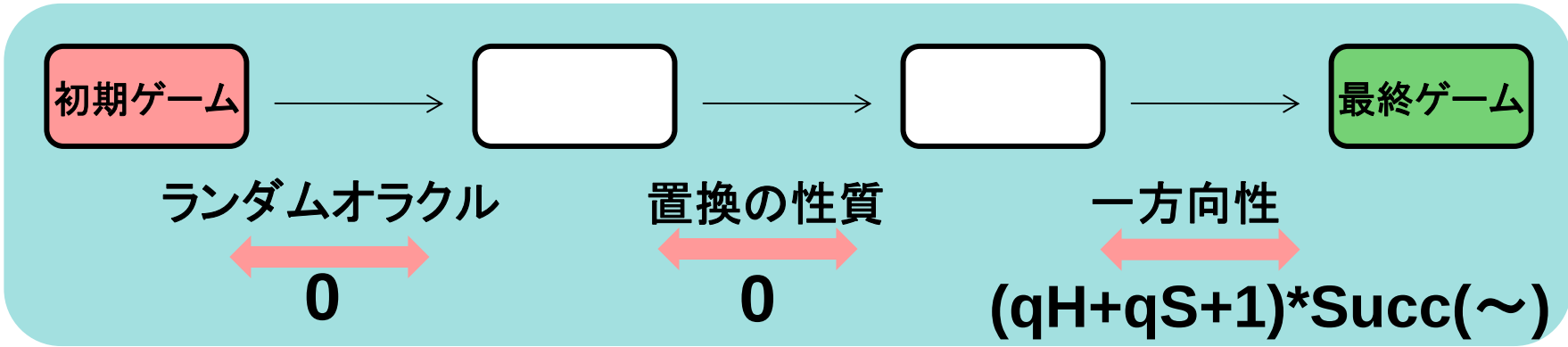
CryptoVerif による証明の概要 (CSS2008@沖縄)

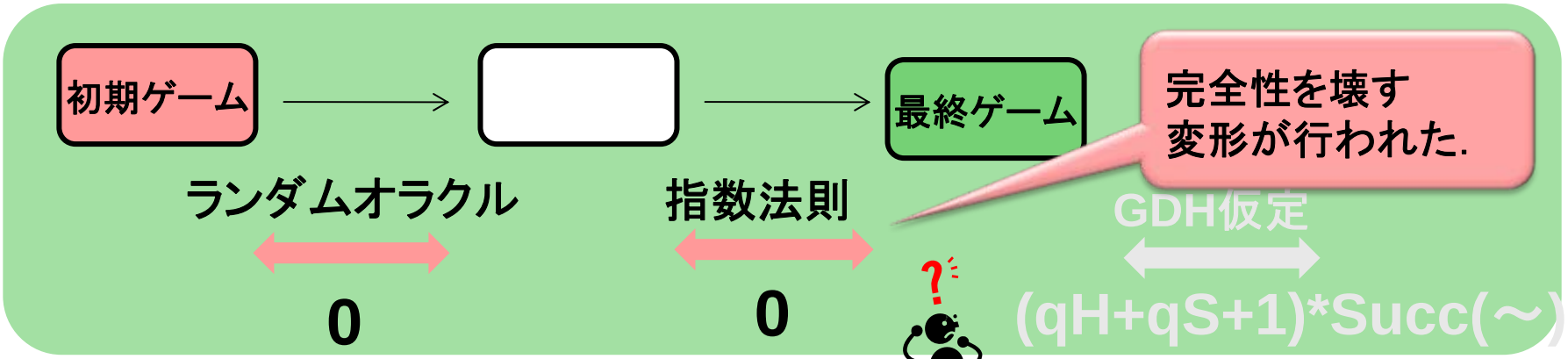
FDH署名のための規則

ランダムオラクル： 0
置換の性質 ：0
一方向性 ：nk*nf*Succ(～)

GDH署名のための規則

ランダムオラクル： 0
指数法則: 0
Gap DH仮定 ：nk*nf*Succ(～)





発表の流れ

- **CSS2008 で行った発表**
  - 背景
  - FDH署名とGDH署名の安全性証明
  - 考察
    - 行われた変形
    - 変形の意味
    - 原因とその回避
- **defined( ) と otheruses( )**
- **対策案と効果の考察**
- **まとめ**

ランダムオラクルに対して行われた変形 (CSS2008@沖縄)

0

ランダムオラクル

```
! !_19 <= qH
 in(c5[!_19], x: bitstring);
 out(c6[!_19], hash(x))
```

指数法則

1.5

```
! !_19 <= qH
 in(c5[!_19], x: bitstring);
 let x_28: bitstring = cst_bitstring in
 find  suchthat defined(y_37, m', x_24, r_23) && otheruses(r_23) && (x = m') then
   out(c6[!_19], f(pkgen(r), y_37))
 orfind @i_34 <= qS suchthat defined(y_35[@i_34], m[@i_34], x_26[@i_34], r_25[@
i_34]) && otheruses(r_25[@i_34]) && (x = m[@i_34]) then
   out(c6[!_19], f(pkgen(r), y_35[@i_34]))
 orfind @i_33 <= qH suchthat defined(y_39[@i_33], x[@i_33], x_28[@i_33], r_27[@
i_33]) && otheruses(r_27[@i_33]) && (x = x[@i_33]) then
   out(c6[!_19], f(pkgen(r), y_39[@i_33]))
 else
   new y_39: modq;
   let r_27: typeg = cst_typeg in
   out(c6[!_19], f(pkgen(r), y_39))
```

↓ x が問合せ済なら 以前の r を返す

← x が初出なら r をランダムに選択して返す

簡略化

2

```
! !_19 <= qH
 in(c5[!_19], x: bitstring);
 new y_40: Zq;
 out(c6[!_19], f(pkgen(r), y_40))
```

変形後のゲームの意味 (CSS2008@沖縄)

2

```
! !_19 <= qH
 in(c5[!_19], x: bitstring);
 new y_40: modq;
 out(c6[!_19], f(pkgen(r), y_40))
```

← 入力に対して，その都度乱数を返す
⇒ 関数じゃない！

ハッシュ関数が 毎回 ランダムな値を返す
⇒ 署名生成時と署名検証時でハッシュ値が異なる

署名検証: 入力: m

$h \leftarrow H(m)$

$\sigma \leftarrow h^x$

署名検証: 入力: $(\tilde{m}, \tilde{\sigma})$

$\tilde{h} \leftarrow H(\tilde{m})$

$g, v, \tilde{h}, \tilde{\sigma} \stackrel{?}{=} g, g^x, \tilde{h}, \tilde{h}^x$

偽造署名 ⇒ 圧倒的確率で検査式に不合格
偽造に成功する確率は十分小さい.
⇒ 安全な方式だ！

正当な署名 ⇒ 圧倒的確率で検査式に不合格

完全性が壊れた原因 (CSS2008@沖縄)

CryptoVerifでの ランダムオラクルの記述

```
(x:bitstring) nH -> find u <= nH suchthat
                      defined(x[u],r[u])
                       ∧ otheruses(r[u])
                       ∧ x= x[u]
                      then r[u]
                    else
                       new r:G; r.
```

r[u]が find の外で使われていない場合 false を返す.
枝刈り用の関数

⇓ 指数法則 に基づく変形

```
(x:bitstring) nH -> find u <= nH suchthat
                      defined(x[u],r[u],s[u])
                       ∧ otheruses(r[u])
                       ∧ x= x[u]
                      then f(g,s[u])
                    else
                       new s:Zq*; f(g, s).
```

r が find 内ですら使われない.

⇒ 全く使われなくなる.

otheruses を取り除いた場合 (CSS2008@沖縄)

	GDH署名	[BR93] PKE	その他 証明例
オリジナル otheruses 有	×	○	○
オリジナル otheruses 無	○	×	○

- **GDH署名の安全性証明に成功**
  - FDH署名の証明結果と ほぼ同じ結果を得た.
- **[BR93]のPKEは証明不可能に**

otheruses は不要とまでは言えないようだ.

発表の流れ

- CSS2008 で行った発表
  - 背景
  - FDH署名とGDH署名の安全性証明
  - 考察

- **defined( ) と otheruses( )**

- **対策案と効果の考察**

- **まとめ**

今回の内容

- **otherusesを適切に使うことで 正しい証明を行う.**
  - definedとotherusesの処理内容を明らかにする.
  - [BR93]のPKE,CSS2008の例を 正しく証明できるよう修正を加える.
  - 修正の方針
    - 変形規則の書き方を工夫する. (CSS2008)

otherusesの使い方自体を変更する.

結果:今回の修正により・・・

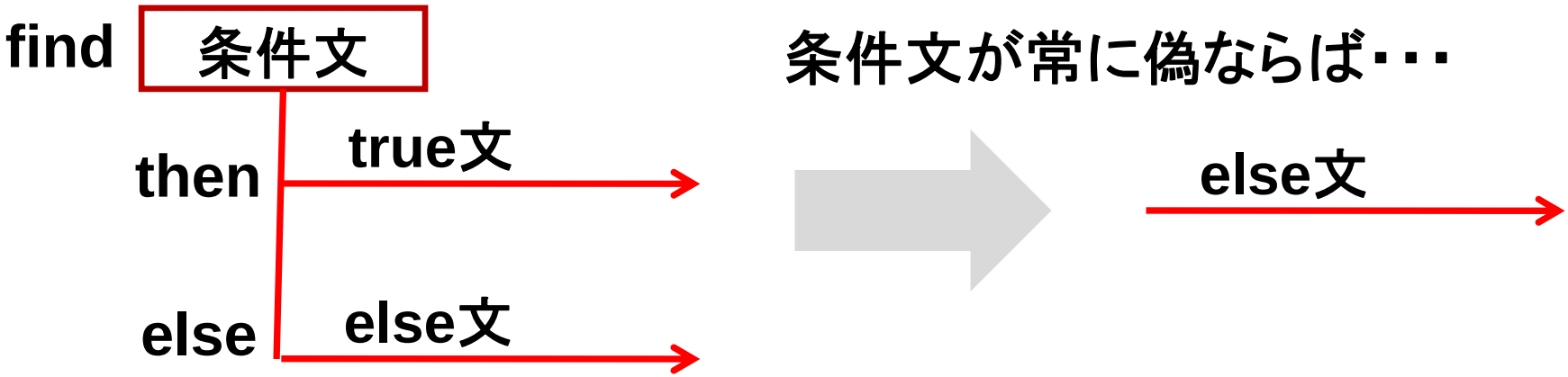
・GDH署名の証明に成功

・[BR93]のPKEの証明にも成功.

今回の修正の効果は要検討.

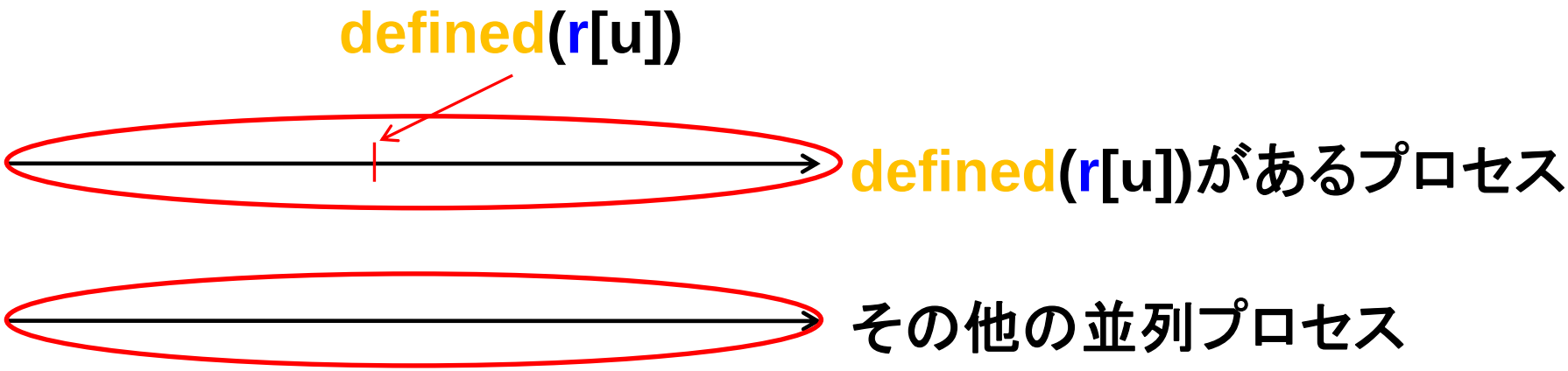
find文と簡約化

u <= n suchthat
defined(r[u]) && otheruses(r[u]) && x = r[u]



otheruses は defined とセットで用いる.
find 文の簡約化を助けるための関数.

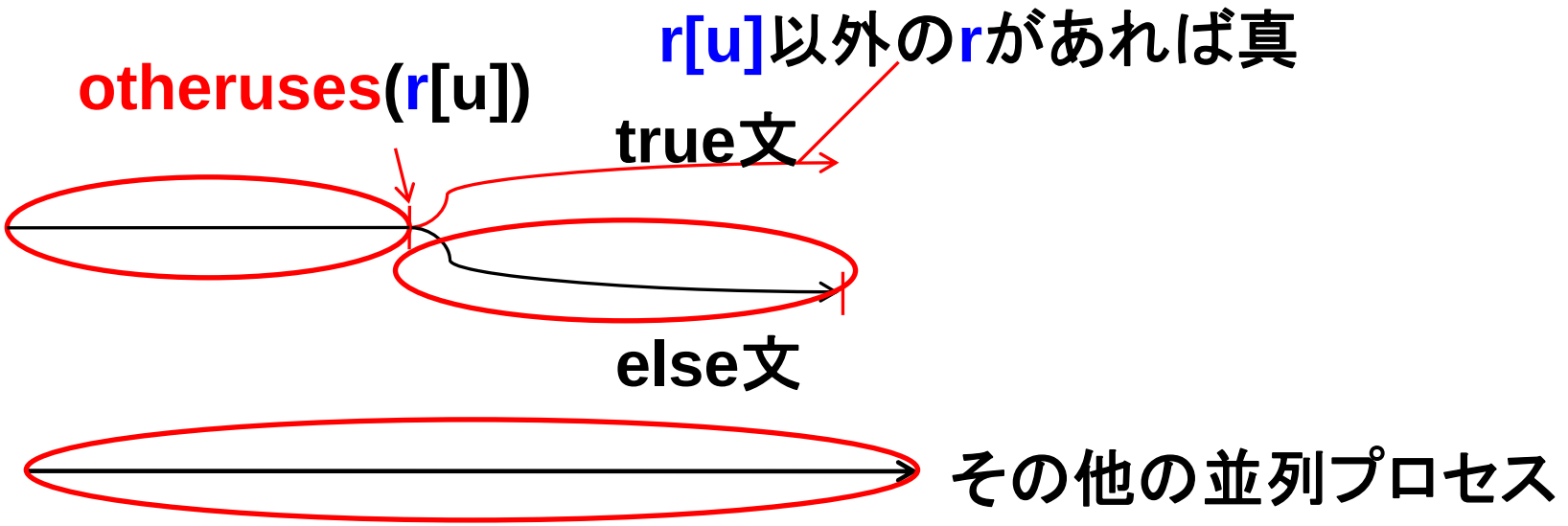
defined(r[u]) の判定の概要



特定の範囲にrが存在すれば真，なければ偽と判定

- !r
- in(channel, r)
- new r
- find r <= n suchthat defined(b) && otheruses(b) && t
- let r = t in p1 else p2

otheruses(r[u]) の判定の概要



特定の範囲にrが存在すれば真，なければ偽と判定

- in(channel, r)
- if r then p1 else p2
- find m <= n suchthat defined(r[m]) && otheruses(r[m]) && r
- let b = r in p1 else p2
- out(channel, r)
- event r

defined と otheruses が関係する書き換え

new r:G;
() → r

new s:Zq;
() → f(g,s)

```
in(x:bitstring)
    find u <= nH suchthat
          defined(x[u],r[u]) ∧ otheruses(r[u])
          ∧ x= x[u]
    then out (r[u])
    else
          new r:G;  out( r ).
```

```
in(x:bitstring)
    find u <= nH suchthat
          defined(x[u],r[u],s[u])∧otheruses(r[u])
          ∧ x= x[u]
    then out (f(g,s[u]))
    else
          new s:Zq;
          let r:G = cst_G in
          out( f(g, s) ).
```

⇒ otheruses(s[u])

検証実験

- **Blanchet が与えた証明例 の検証**
- **我々が与えた証明例の検証 (CSS2008)**

	GDH署名	[BR93] PKE	その他 証明例
オリジナル otheruses 有	×	○	○
オリジナル otheruses 無	○	×	○
修正後 otheruses 有	○	○	○

まとめ

- 目的: CryptoVerif の誤った証明を回避する.
- 方法:ゲームの書き換え規則の適用法に変更を加えた.
  otheruses(r[u]) ⇒ otheruses(s[u])
- 結果:現在知られている誤った証明例を回避できた.

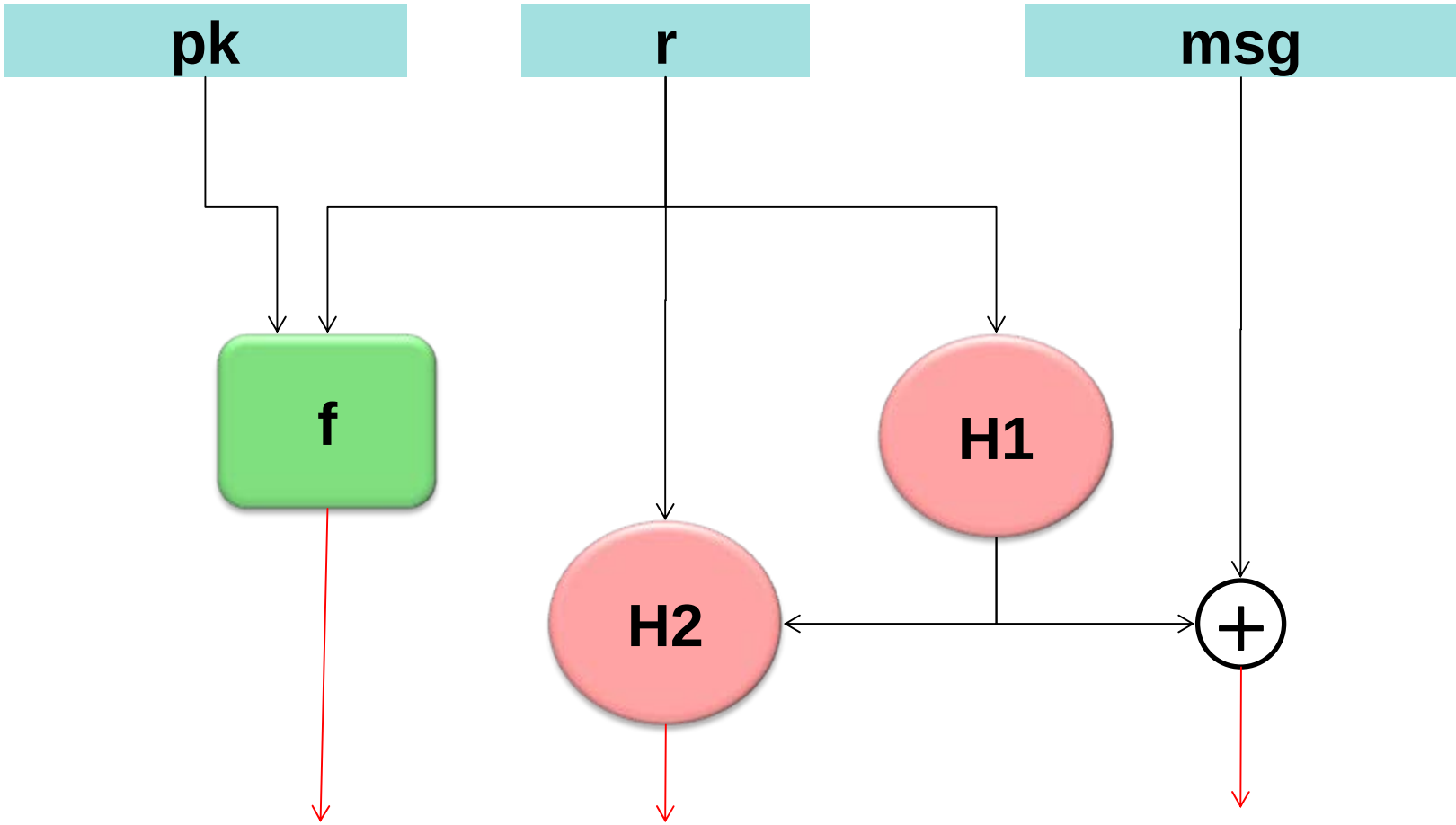
	GDH署名	[BR93] PKE	その他 証明例
オリジナル otheruses 有	×	○	○
オリジナル otheruses 無	○	×	○
修正後 otheruses 有	○	○	○

修正の理論的な正当性は, 未検討.
今後 検討を行う.

TOSHIBA

Leading Innovation

[BR93] の PKE



ランダムオラクルモデル

ランダムオラクル：出力が一様分布となる理想的なハッシュ関数

ランダムオラクルをシミュレートする関数

```
if (m,h)∈H-list then
    return (h);
else
    r ∈R H;
    H-list ← H-list∪{(m,r)}
    return (r);
```